

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

FACULTAD DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

UNIDAD DE POSTGRADO

**Sinterización y estudio de las propiedades físicas y
mecánicas de la aleación $92\text{Cu}8\text{Zn}1\text{Zn}$ ($\text{C}_{10}\text{H}_{35}\text{O}_2$)₂
para la fabricación de cojinetes auto lubricados**

TESIS

para optar el grado académico de Doctor

AUTOR

Julia Marilú Calderón Celis

ASESOR

Walter Francisco Estrada López

Lima – Perú

2008



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
(Universidad Del Perú DECANA DE AMÉRICA)
FACULTAD DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
UNIDAD DE POSGRADO
Telfs. 6197000 Anexo 1805
Av. Venezuela alt. cdra. 34 -Lima 1 – Perú

DICTAMEN N° 097 -DUPG-FII/2008

Ciudad Universitaria, 27 de Octubre del 2008.

VISTO

La solicitud presentada en la Unidad de Posgrado con Expediente N° 03633-FII-08 de fecha 28 de junio de 2008, por la **Mg. Julia Marilú Calderón Celis**, solicitando designación de Jurado Examinador, fecha y hora de Sustentación Oral y Pública de su tesis titulada: "**SINTERIZACIÓN Y ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA ALEACIÓN $92\text{Cu}8\text{Zn}1\text{Zn}(\text{C}_{10}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$ PARA LA FABRICACIÓN DE COJINETES AUTOLUBRICADOS**", para optar el Grado Académico de Doctora en Ingeniería Industrial.

CONSIDERANDO:

Que, mediante el Dictamen N° 023-DUPG-FII-2008 de fecha 03 de octubre de 2007, se designó Jurado Informante, conformado por los señores profesores:

Dr. Aristides Sotomayor Cabrera, Dr. Walter Estrada López, y Dr. Walter Esteban Barrutia Feijoo, para la revisión y evaluación de la tesis titulada: : "**SINTERIZACIÓN Y ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA ALEACIÓN $92\text{Cu}8\text{Zn}1\text{Zn}(\text{C}_{10}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$ PARA LA FABRICACIÓN DE COJINETES AUTOLUBRICADOS**", solicitado por la **Mg. Julia Marilú Calderón Celis**, para optar el Grado Académico de Doctora en Ingeniería Industrial;

Que, habiendo presentado los informes favorables de los docentes miembros del Jurado Informante: **Dr. Walter Estrada López**, con fecha 22 de octubre de 2007 y el **Dr. Walter Esteban Barrutia Feijoo**, con fecha 27 de noviembre de 2007, **Dr. Aristides Sotomayor Cabrera**, con fecha 13 de junio de 2008

Que, en la Unidad de Posgrado se recepcionó con Expediente N° 03633-FII-08 de fecha 28 de junio de 2008 seis (06) ejemplares para la sustentación Oral y Pública de la tesis titulada: "**SINTERIZACIÓN Y ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA ALEACIÓN $92\text{Cu}8\text{Zn}1\text{Zn}(\text{C}_{10}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$ PARA LA FABRICACIÓN DE COJINETES AUTOLUBRICADOS**", presentada por la **Mg. Julia Marilú Calderón Celis** para optar el Grado Académico de Doctora en Ingeniería Industrial;

En uso de las atribuciones que el Estatuto de la Universidad y la Resolución Rectoral N° 02993-R-07 del 31 de mayo del 2007, le confieren al Director de la Unidad de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Industrial;

SE DICTAMINA:

Artículo 1°.- Designar a los señores Miembros del Jurado Examinador para la Sustentación Oral y Pública de la tesis: "**SINTERIZACIÓN Y ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA ALEACIÓN $92\text{Cu}8\text{Zn}1\text{Zn}(\text{C}_{10}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$ PARA LA FABRICACIÓN DE COJINETES AUTOLUBRICADOS**",

presentada por la **Mg. Julia Marilú Calderón Celis** para optar el Grado Académico de Doctora en Ingeniería Industrial, conformado de la siguiente manera:

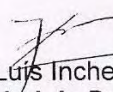
Presidente :	Dr. José Séptimo Gómez Carrión
Asesor :	Dr. Walter Estrada López
Miembros :	Dr. Néstor Italo Chacón Abad
	Dr. Walter Esteban Barrutia Feijoo
	Dr. Eulogio Carlos Hurtado Dianderas Smith

Artículo 2° .- Fijar la fecha de Sustentación Oral y Pública de la precitada Tesis, para el día Jueves 13 de noviembre del 2008, a las 11.00 horas en el Salón de Grados de la Facultad de Ingeniería Industrial.

Artículo 3°. Transcribese el presente Dictamen al interesado e inclúyase a su Expediente para los efectos correspondientes.

Regístrese, comuníquese y archívese

Atentamente,


Mg. Jorge Luis Inche Mitma
Director de la Unidad de Posgrado FII



JLIM/ylmr



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

(Universidad Del Perú DECANA DE AMÉRICA)

FACULTAD DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

UNIDAD DE POSGRADO

Telfs. 6197000 Anexo 1805

Av. Venezuela alt. cdra. 34 -Lima 1 – Perú

ACTA DE SUSTENTACIÓN N° 002.UPG.FII.2008

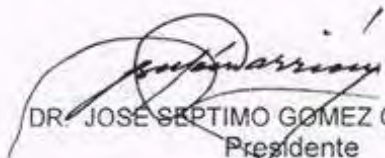
**SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE
DOCTOR EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**

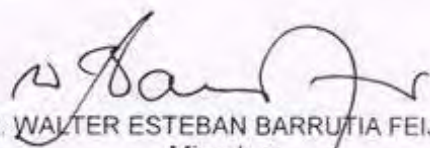
En la ciudad de Lima, a los trece días del mes de noviembre del año dos mil ocho, siendo las doce horas, en acto público se instaló el Jurado Examinador para la Sustentación de la Tesis intitulada: **"SINTERIZACIÓN Y ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA ALEACIÓN $92\text{Cu}8\text{Zn}1\text{Zn}(\text{C}_{10}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$ PARA LA FABRICACIÓN DE COJINETES AUTOLUBRICADOS"**, presentada por la **Mg. Julia Marilú Calderón Celis** para optar el Grado Académico de Doctor en Ingeniería Industrial.

Luego de la exposición y absueltas las preguntas del Jurado Examinador se procedió a la calificación individual y secreta, habiendo sido *aprobado* con la calificación de *Aprobado por unanimidad*


El Jurado recomienda que la Facultad acuerde el otorgamiento del Grado Académico de Doctor en Ingeniería Industrial a la **Mg. Julia Marilú Calderón Celis**.

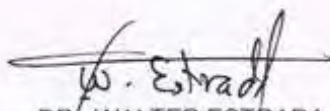
En señal de conformidad, siendo las *13.45* horas se suscribe la presente acta en cuatro ejemplares, dándose por concluido el acto.


DR. JOSÉ SÉPTIMO GÓMEZ CARRION
Presidente


DR. WALTER ESTEBAN BARRUTIA FEJOO
Miembro


DR. NÉSTOR ITALO CHACÓN ABAD
Miembro,


DR. EULOGIO CARLOS HURTADO DIANDERAS SMITH
Miembro


DR. WALTER ESTRADA LOPEZ
Asesor

DEDICATORIA

Con amor y eterna gratitud:

**A la memoria de mi padre César
y a mi madre Iris
por sus valiosos consejos
y apoyo permanente.**

DEDICATORIA

Con mucho amor:

**A mi esposo José Antonio
por su amor, paciencia,
comprensión y
apoyo incondicional.**

DEDICATORIA

Con mucho amor:

A mis hijos

Manuel Alejandro y

Marco Antonio

que son la razón de mi vida

y motivación constante.

Agradecimientos

- » Al Dr. Walter Estrada López por su asesoría, paciencia y consejos oportunos.
- » Al Mg. Javier del Carpio Gallegos y al Ing. Guillermo Flores Machado por su apoyo invaluable.
- » Al Mg. Jorge Luis Inche Mitma, Dr. Walter Estebán Barrutia Feijoo, Dr. Eulogio Hurtado Dianderas Smith, Dr. Jose Séptimo Gómez Carrión, Dr. Arístides Sotomayor Cabrera, Dr. Néstor Ítalo Chacón Abad y al Dr. Justo Alcides Rojas Tapia por su consejos pertinentes.
- » A la Lic. Lilia Llanto Chávez por su contribución en la revisión y corrección de este Trabajo de Investigación.

RESUMEN

En la actualidad, uno de los factores que impulsa el desarrollo de la economía de un país es la tecnología. En el Perú este desarrollo puede cimentarse sobre la base de utilizar nuestros recursos naturales como el cobre y zinc para ingresar a una nueva etapa moderna que nos permitirá estar a la vanguardia tecnológica en la fabricación de cojinetes autolubricados con aplicación industrial.

Lo más importante para el progreso de nuestro país es desarrollar innovaciones tecnológicas y lograr una gran producción de lotes de piezas de precisión, con materiales o mezclas poco comunes controlando el coeficiente de rotura y el cambio dimensional.

En el presente trabajo de investigación se demuestra que es viable la fabricación de cojinetes autolubricados con la nueva aleación $92\text{Cu}8\text{Zn}1\text{Zn}(\text{C}_{10}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$, para ello se prepararon probetas, las cuales fueron sometidas a diferentes condiciones de temperatura y tiempo de sinterizado, permitiendo de esta manera obtener valores de carga de rotura, porcentaje de cobre, porcentaje de zinc y variación dimensional en el diámetro exterior, en el interior y en la longitud de los cojinetes.

Los datos obtenidos fueron procesados con los software Statgraphics plus y el SPSS, de los cuales se obtuvieron cuatro modelos matemáticos empíricos con un rango de aplicación de:

Temperatura de sinterizado	: 880 – 910 °C
Tiempo de sinterizado	: 10 – 20 minutos
Porcentaje de cobre	: 91 – 92 %
Porcentaje de zinc	: 5.83 – 8 %

1. Modelo Matemático Empírico MC1 para el coeficiente de fractura (FR) de los cojinetes autolubricados:

$$\text{FR} = -119.38 + 0.0788816 \cdot T + 0.229745 \cdot t + 0.623392 \cdot \text{Cu} - 0.152118 \cdot \text{Zn}$$

Con un $R^2 = 60.2191\%$ y dado que el valor sig en el análisis de varianza es inferior a 0.01 existe relación estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza del 99%.

El estadístico R^2 indica que el modelo MC1 explica un 60.2% de la variabilidad en el Factor de resistencia a la rotura radial del cojinete sinterizado.

2. Modelo Matemático Empírico MC2 para el cambio dimensional en el diámetro exterior (CDE) de los cojinetes autolubricados.

$$\text{CDE} = -107,795 - 0,00870856 \cdot T - 0,0812205 \cdot t + 1,2347 \cdot \text{Cu} + 0,309536 \cdot \text{Zn}$$

Con un $R^2 = 61,0434 \%$ y como el valor sig en el análisis de varianza es inferior a 0.01, existe relación estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza del 99%.

El estadístico R^2 nos indica que el modelo MC2 explica un 61.0% de la variabilidad en el Cambio dimensional en el diámetro exterior del cojinete sinterizado.

3. Modelo Matemático Empírico MC3 para el cambio dimensional en el diámetro interior (CDI) de los cojinetes autolubricados

$$\text{CDI} = 66,5426 - 0,00338034 \cdot T - 0,115796 \cdot t - 0,684216 \cdot \text{Cu} - 0,0774167 \cdot \text{Zn}$$

Con un $R^2 = 32,5963 \%$ y el valor sig en el análisis de varianza es inferior a 0.05, existe relación estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza del 95%.

El estadístico R^2 nos indica que el modelo MC3 explica un 32.6% de la variabilidad en el Cambio dimensional en el diámetro interior del cojinete sinterizado.

4. Modelo Matemático Empírico MC4 para el cambio dimensional en la longitud (CDL) de los cojinetes autolubricados

$$\text{CDL} = 10,0876 - 0,00296794 * T - 0,0637663 * t - 0,0481257 * Cu - 0,0608305 * Zn$$

Con un $R^2 = 52,2334 \%$ y como el valor sig en el análisis de varianza es inferior a 0.01, existe relación estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza del 99%.

El estadístico R^2 indica que el modelo MC4 explica un 52.2% de la variabilidad en el Cambio dimensional en la longitud del cojinete sinterizado.

SUMMARY

At the present time, one of the factors that impels the development of the economy of a country is the technology. In Peru this development can be built on the base of using our natural resources as copper and zinc to enter into a new modern stage that will allow us to be in the technological vanguard in the production of oil-impregnated bearings with industrial application.

The most important thing for the progress of our country is to develop technological innovations and to achieve a great production of lots of pieces of precision, with materials or mixtures not conventional keeping in mind the rupture coefficient and the dimensional change of the oil-impregnated bearings.

Presently investigation work is demonstrated that is possible the production of oil-impregnated bearings with the new alloy $92\text{Cu}8\text{Zn}1\text{Zn}(\text{C}_{10}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$, it was necessary that is why they got ready its samples, which were subjected at different conditions of temperature and time of sinterized, allowing us to get breaking load, copper percentage, zinc percentage and dimensional change in the external diameter, in the internal and in the longitude data of the oil-impregnated bearings.

The obtained data were processed with the software Statgraphics Plus and the SPSS, of which four empiric mathematical models were obtained with an application range of:

Sinterized temperature	: 880 - 910 °C
Time of sinterizado	: 10 - 20 minutes
Copper percentage	: 91 - 92%
Zinc Percentage	: 5.8 - 8.0%

1. Empiric Mathematical Model MC1 for the fracture coefficient (FR) of the oil-impregnated bearings is:

$$\text{FR} = -119.38 + 0.0788816 \cdot T + 0.229745 \cdot t + 0.623392 \cdot \text{Cu} - 0.152118 \cdot \text{Zn}$$

With a $R^2 = 60.2191\%$, since the value sig in the variance analysis is inferior at 0.01 relationship exists statistically significant among the variables for a confidence level of 99%.

The statistical R^2 indicates that the Empiric Mathematical Model MC1 explains 60.2% of the variability in the resistance Factor to the radial break of the oil-impregnated bearings.

2. Empiric Mathematical Model MC2 for the dimensional change in the external diameter (CDE) of the oil-impregnated bearings.

$$\text{CDE} = -107,795 - 0,00870856 \cdot T - 0,0812205 \cdot t + 1,2347 \cdot \text{Cu} + 0,309536 \cdot \text{Zn}$$

With a $R^2 = 61,0434\%$, as the value sig in the variance analysis is inferior at 0.01, relationship exists statistically significant among the variables for a confidence level of 99%.

The statistical R^2 indicates us that the Empiric Mathematical Model MC2 explains 61.0% of the variability in the dimensional Change in the external diameter of the oil-impregnated bearings.

3. Empiric Mathematical Model MC3 for the dimensional control in the internal diameter (CDI) of the oil-impregnated bearings.

$$\text{CDI} = 66,5426 - 0,00338034 \cdot T - 0,115796 \cdot t - 0,684216 \cdot \text{Cu} - 0,0774167 \cdot \text{Zn}$$

With a $R^2 = 32,5963\%$, the value sig in the variance analysis is inferior at 0.05, relationship exists statistically significant among the variables for a confidence level of 95%.

The statistical R^2 indicates us that the Empiric Mathematical Model MC3 explains 32.6% of the variability in the dimensional control in the internal diameter of the oil-impregnated bearings.

4. Empiric Mathematical Model MC4 for the dimensional control in the longitude (CDL) of the sinterized bearings

$$\text{CDL} = 10,0876 - 0,00296794 * T - 0,0637663 * t - 0,0481257 * \text{Cu} - 0,0608305 * \text{Zn}$$

With a $R^2 = 52,2334\%$, as the value sig in the variance analysis is inferior at 0.01, relationship exists statistically significant among the variables for a confidence level of 99%.

The statistical R^2 indicates that the Empiric Mathematical Model MC4 explains 52.2% of the variability in the dimensional control in the longitude of the oil-impregnated bearings.

RESUMO

Na atualidade, um dos fatores que impelem o desenvolvimento da economia de um país é a tecnologia. Em Peru este desenvolvimento pode ser construído na base de usar nossos recursos naturais como cobre e zinco entrar em uma fase moderna nova que nos permitirá estar na vanguarda tecnológica na produção de mancais porosos auto-lubrificantes com aplicação industrial.

A coisa mais importante para o progresso de nosso país é desenvolver inovações tecnológicas e alcançar uma grande produção de muitos pedaços de precisão, com materiais ou misturas não convencional controlando o coeficiente de ruptura e a mudança dimensional dos mancais porosos auto-lubrificantes.

Neste trabalho de investigação demonstrou que é possível a produção de mancais porosos auto-lubrificantes com a nova liga $92\text{Cu}8\text{Zn}1\text{Zn}(\text{C}_{10}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$, para lo cual era necessário preparar amostras que foram sujeitadas a diferentes condições de temperatura e tempo de sinterização que nos permitem adquirir carga de rompimento, porcentagem de cobre, porcentagem de zinco e mudança dimensional no diâmetro externo, no diâmetro interno e a longitude dos mancais porosos auto-lubrificantes.

Os dados obtidos foram processados com o software Statgraphics Mais e o SPSS do qual foram obtidos quatro modelos matemáticos empíricos com uma gama de aplicação de:

Temperatura de sinterização	: 880 - 910 °C
Tempo de sinterização	: 10 - 20 minutos
Porcentagem de cobre	: 91 – 92 %
Porcentagem de zinco	: 5.8 - 8.0 %

1. Modelo Matemático empírico MC1 para o coeficiente de fratura (FR) dos mancais porosos auto-lubrificantes

$$\text{FR} = -119.38 + 0.0788816 \cdot T + 0.229745 \cdot t + 0.623392 \cdot \text{Cu} - 0.152118 \cdot \text{Zn}$$

Com um $R^2 = 60.2191\%$, como o sig de valor no análise de variância é inferior ao 0.01 existe relação statistically significante entre as variáveis para um nível de confiança de 99%.

O R^2 estatístico indica que o Modelo Matemático Empírico MC1 explica 60.2% da variabilidade no Fator de resistência para a fratura radial dos mancais porosos auto-lubrificantes. .

2. Modelo Matemático empírico MC2 para a mudança dimensional no diâmetro externo (CDE) dos mancais porosos auto-lubrificantes.

$$\text{CDE} = -107,795 - 0,00870856 \cdot T - 0,0812205 \cdot t + 1,2347 \cdot \text{Cu} + 0,309536 \cdot \text{Zn}$$

Com um $R^2 = 61,0434\%$, como o sig de valor no análise de variância é inferior ao 0.01, existe relação statistically significante entre as variáveis para um nível de confiança de 99%.

O R^2 estatístico nos indica que o Modelo Matemático Empírico MC2 explica 61.0% da variabilidade na mudança dimensional no diâmetro externo dos mancais porosos auto-lubrificantes.

3. Modelo Matemático empírico MC3 para a mudança dimensional no diâmetro interno (CDI) dos mancais porosos auto-lubrificantes.

$$\text{CDI} = 66,5426 - 0,00338034 \cdot T - 0,115796 \cdot t - 0,684216 \cdot \text{Cu} - 0,0774167 \cdot \text{Zn}$$

Com um $R^2 = 32,5963\%$, como o sig de valor no análise de variância é inferior ao 0.05, existe relação statistically significante entre as variáveis para um nível de confiança de 95%.

O R^2 estatístico nos indica que o Modelo Matemático Empírico MC3 explica 32.6% da variabilidade no mudança dimensional no diâmetro interno dos mancais porosos auto-lubrificantes.

4. Modelo Matemático empírico MC4 para a mudança dimensional na longitude (CDL) dos mancais porosos auto-lubrificantes.

$$CDL = 10,0876 - 0,00296794 * T - 0,0637663 * t - 0,0481257 * Cu - 0,0608305 * Zn$$

Com um $R^2 = 52,2334\%$, como o sig de valor no análise de variância é inferior ao 0.01, existe relação statistically significante entre as variáveis para um nível de confiança de 99%.

O R^2 estatístico indica que o Modelo Matemático Empírico MC4 explica 52.2% da variabilidade no mudança dimensional na longitude dos mancais porosos auto-lubrificantes.

LISTA DE CUADROS

	Pag
2.1 Dirección y efecto del desplazamiento de vacantes en la difusión de volumen.	41
2.2 Propiedades de los Cojinetes Autolubricados	49
3.1 Composición Química de la Nueva Aleación $92\text{Cu}8\text{Zn}1\text{Zn}(\text{C}_{10}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$	52
3.2 Código-Carga radial (kg)	53
3.3 Código- Cambio dimensional en el Ø exterior, Ø Interior y en la longitud (%)	54
3.4 Código- Densidad (gr/cm^3), Porosidad (%)y el Contenido de Aceite (cm^3)	54
3.5 Código - Análisis químico de Cobre y Zinc(%)	55
3.6 Código-Metalografía	55
3.7 Mezcla metálica de Cobre y Zinc y Estearato de zinc	56
3.8 Análisis granulométrico del polvo de cobre	60
3.9 Análisis granulométrico del polvo de zinc	60
3.10 Análisis químico - % de Cobre en el Cojinete	61
3.11 Análisis químico - % de Zinc en el Cojinete	61

	Pag
3.12 Resultados del ensayo de la Carga radial (kg)	62
3.13 Resultados del Factor de resistencia a la rotura radial	63
3.14 Resultados del Cambio dimensional en el diámetro exterior (%)	64
3.15 Resultados del Cambio dimensional en el diámetro interior (%)	64
3.16 Resultados del Cambio dimensional en la longitud (%)	65
4.1 Resumen del Modelo del Factor de resistencia a la rotura radial.	87
4.2 Anova del Modelo del Factor de resistencia a la rotura radial.	87
4.3 Coeficientes del Modelo del Factor de resistencia a la rotura radial.	88
4.4 Resumen del Modelo del Cambio dimensional en el diámetro exterior.	96
4.5 Anova del Cambio dimensional en el diámetro exterior	96
4.6 Coeficientes del Cambio dimensional en el diámetro exterior	97
4.7 Resumen del Modelo del cambio dimensional en el diámetro interior.	105
4.8 Anova del Cambio dimensional en el diámetro interior	105
4.9 Coeficientes del Cambio dimensional en el diámetro interior del cojinete sinterizado.	106
4.10 Resumen del Modelo del cambio dimensional en la longitud.	114
4.11 Anova del Cambio dimensional en la longitud.	114
4.12 Coeficientes del Cambio dimensional en la longitud (a) del cojinete sinterizado.	115
4.13 Variables de la regresión múltiple.	119

LISTA DE FIGURAS

	Pag
1.1 Proceso de obtención de la aleación sinterizada $92\text{Cu}8\text{Zn}1\text{Zn}(\text{C}_{10}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$	2
2.1 Atomización con gas	21
2.2 Tamices TYLER.	23
2.3 Flujómetro HALL.	23
2.4 Características del Flujómetro HALL.	24
2.5 Esquema de diferentes mecanismos de la difusión en los metales	27
2.6 Esquema de un acto elemental de difusión según el mecanismo internodal y energía potencial.	30
2.7 Esquema de un acto elemental de difusión según el mecanismo de vacancias y energía potencial.	31
2.8 Etapa de los poros interconectados.	38
2.9 Mecanismos de la Sinterización.	39
2.10 Etapa de poros aislados	40
2.11 Posibles trayectorias de difusión a través de las vacantes de la red	42
2.12 Esquema del mecanismo de la difusión de volumen en torno a un poro.	43

	Pag.
2.13	Horno de Atmósfera 44
2.14	Control de la Velocidad de Calentamiento, del Tiempo y la Temperatura del horno de sinterización. 45
3.1	Piezas sinterizadas autolubricadas 57
3.2	Cojinete cilíndrico 57
3.3	Mezclador de polvos 58
3.4	Micrografía del Sinterizado a 880°C x 10 min. Sin ataque. 100x. 66
3.5	Micrografía del Sinterizado a 880°C x 10 min. Sin ataque. 500x. 66
3.6	Micrografía del Sinterizado a 880°C x 10 min. Sin ataque. 1000x. 67
3.7	Micrografía del Sinterizado a 880°C x 15 min. Sin ataque. 100x. 67
3.8	Micrografía del Sinterizado a 880°C x 15 min. Sin ataque. 500x. 68
3.9	Micrografía del Sinterizado a 880°C x 15 min. Sin ataque. 1000x. 68
3.10	Micrografía del Sinterizado a 880°C x 20 min. Sin ataque. 100x. 69
3.11	Micrografía del Sinterizado a 880°C x 20 min. Sin ataque. 500x. 69
3.12	Micrografía del Sinterizado a 880°C x 20 min. Sin ataque. 1000x. 70
3.13	Micrografía del Sinterizado a 900°C x 10 min. Sin ataque. 100x. 70
3.14	Micrografía del Sinterizado a 900°C x 10 min. Sin ataque. 500x. 71
3.15	Micrografía del Sinterizado a 900°C x 10 min. Sin ataque. 1000x. 71
3.16	Micrografía del Sinterizado a 900°C x 15 min. Sin ataque. 100x. 72
3.17	Micrografía del Sinterizado a 900°C x 15 min. Sin ataque. 500x. 72
3.18	Micrografía del Sinterizado a 900°C x 15 min. Sin ataque. 1000x. 73
3.19	Micrografía del Sinterizado a 900°C x 20 min. Sin ataque. 100x. 73
3.20	Micrografía del Sinterizado a 900°C x 20 min. Con ataque. 500x. 74
3.21	Micrografía del Sinterizado a 900°C x 20 min. Con ataque. 1000x. 74
3.22	Micrografía del Sinterizado a 910°C x 10 min. Sin ataque. 100x. 75
3.23	Micrografía del Sinterizado a 910°C x 10 min. Sin ataque. 500x. 75
3.24	Micrografía del Sinterizado a 910°C x 10 min. Sin ataque. 1000x. 76
3.25	Micrografía del Sinterizado a 910°C x 15 min. Sin ataque. 100x. 76
3.26	Micrografía del Sinterizado a 910°C x 15 min. Sin ataque. 500x. 77
3.27	Micrografía del Sinterizado a 910°C x 15 min. Sin ataque. 1000x. 77

	Pag
3.28	Micrografía del Sinterizado a 910°C x 20 min. Sin ataque. 100x. 78
3.29	Micrografía del Sinterizado a 910°C x 20 min. Sin ataque. 500x. 78
3.30	Micrografía del Sinterizado a 910°C x 20 min. Sin ataque. 1000x. 79
4.1	Media del factor de resistencia a la rotura radial en función a los bloques obtenido a diferentes temperaturas y tiempos. 82
4.2	Media del Factor de resistencia a la rotura radial en función al tratamiento de sinterizado 83
4.3	Residuos estandarizados del Factor de resistencia de rotura radial 84
4.4	Normalidad de los Residuos estandarizados del Factor de resistencia de rotura radial 84
4.5	Factor de resistencia a la rotura radial en función de la temperatura. 85
4.6	Factor de resistencia a la rotura radial en función del tiempo 85
4.7	Factor de resistencia a la rotura radial en función del cobre. 86
4.8	Factor de resistencia a la rotura radial en función del zinc. 86
4.9	Residuos del Factor de resistencia a la rotura radial en función del número de datos. 88
4.10	Residuos del Factor de resistencia a la rotura radial en función a la Temperatura. 89
4.11	Residuos del Factor de resistencia a la rotura radial en función del tiempo. 89
4.12	Residuos del Factor de resistencia a la rotura radial en función del %Cu. 90
4.13	Residuos del Factor de resistencia a la rotura radial en función al %Zn. 90
4.14	Media del Cambio dimensional en el diámetro exterior en función a los bloques diseñados a diferentes temperaturas y tiempos. 91
4.15	Media del Cambio dimensional en el diámetro exterior en función al tratamiento de sinterizado. 92
4.16	Residuos del Cambio dimensional en el diámetro exterior en función del número de datos. 93

	Pag
4.17	Normalidad de los residuos del Cambio dimensional en el diámetro exterior. 93
4.18	Cambio dimensional en el diámetro exterior en función a la temperatura. 94
4.19	Cambio dimensional en el diámetro exterior en función al tiempo. 94
4.20	Cambio dimensional en el diámetro exterior en función al %Cobre 95
4.21	Cambio dimensional en el diámetro exterior en función al % de zinc. 95
4.22	Residuos del Cambio dimensional en el diámetro exterior en función del número de datos. 97
4.23	Residuos del Cambio dimensional en el diámetro exterior en función de la temperatura. 98
4.24	Residuos del Cambio dimensional en el diámetro exterior en función del tiempo. 98
4.25	Residuos del Cambio dimensional en el diámetro exterior en función del % de Cobre. 99
4.26	Residuos del Cambio dimensional en el diámetro exterior en función del % de Zinc. 99
4.27	Media del Cambio dimensional en el diámetro interior en función a los bloques diseñados a diferentes temperaturas y tiempos. 100
4.28	Media del Cambio dimensional en el diámetro interior en función al tratamiento de sinterizado. 101
4.29	Residuos estandarizados del Cambio dimensional en el diámetro interior. 102
4.30	Normalidad de los residuos estandarizados del Cambio dimensional en el diámetro interior. 102
4.31	El Cambio dimensional en el diámetro interior en función de la temperatura 103
4.32	El Cambio dimensional en el diámetro interior en función del tiempo. 103

	Pag
4.33 El Cambio dimensional en el diámetro interior en función al porcentaje de cobre.	104
4.34 Cambio dimensional en el diámetro interior en función al porcentaje de zinc.	104
4.35 Residuos del Cambio dimensional en el diámetro interior en función del número de datos.	106
4.36 Residuos del Cambio dimensional en el diámetro interior en función a la temperatura.	107
4.37 Residuos del Cambio dimensional en el diámetro interior en función al tiempo.	107
4.38 Residuos del Cambio dimensional en el diámetro interior l en función del % de cobre.	108
4.39 Residuos del Cambio dimensional en el diámetro interior l en función del % de zinc.	108
4.40 Media del Cambio dimensional en la longitud en función a los bloques diseñados a diferentes temperaturas y tiempos.	109
4.41 Media del Cambio dimensional en la longitud en función al tratamiento de sinterizado.	110
4.42 Residuos estandarizados del Cambio dimensional en la longitud.	111
4.43 Normalidad de los residuos estandarizados del Cambio dimensional en la longitud.	111
4.44 Cambio dimensional en la longitud en función de la temperatura.	112
4.45 Cambio dimensional en la longitud en función del tiempo.	112
4.46 Cambio dimensional en la longitud en función al porcentaje de cobre.	113
4.47 Cambio dimensional en la longitud en función al porcentaje de zinc.	113
4.48 Residuos del Cambio dimensional en la longitud en función del número de datos.	115
4.49 Residuos del Cambio dimensional en la longitud en función de la temperatura.	116

	Pag
4.50 Residuos del Cambio dimensional en la longitud en función del tiempo.	116
4.51 Residuos del Cambio dimensional en la longitud en función del porcentaje de cobre.	117
4.52 Residuos del Cambio dimensional en la longitud en función del zinc.	117

CONTENIDO

	Página
RESUMEN	v
ABSTRACT	viii
RESUMO	xi
LISTA DE CUADROS	xiv
LISTA DE FIGURAS	xvi
CONTENIDO	xxii
PROLOGO	xxvii
CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO.	1
1.1 Situación Problemática.	1
1.2 Problema de Investigación.	4
1.2.1 Problema general.	4
1.2.2 Problemas específicos..	4
1.3 Justificación.	4

1.4	Objetivos	5
1.4.1	Objetivo general.	5
1.4.2	Objetivos específicos.	5
1.5	Hipótesis	6
1.5.1	Hipótesis general	6
1.5.2	Hipótesis específicas	6
1.6	Variables	7
1.6.1	Variables independientes.	7
1.6.2	Variables dependientes	7
1.6.3	Indicadores e índices.	8
1.7	Tipo de investigación.	8
1.8	Diseño de la investigación	8
Capítulo II	MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL.	10
2.1	La Pulvimetalurgia	10
2.1.1	Conceptualización.	10
2.1.2	Antecedentes	11
2.1.3	Ventajas de la Pulvimetalurgia.	13
2.2	Materiales Sinterizados.	13
2.2.1	Concepto de Material Sinterizado.	16
2.2.2	Tipos de Materiales Sinterizados y sus Aplicaciones.	16
2.2.2.1	Materiales Refractarios.	16
2.2.2.2	Materiales Compuestos.	17
2.2.2.3	Materiales porosos.	17
2.2.2.4	Aleaciones para Piezas Estructurales.	19
2.2.2.5	Aleaciones Especiales.	19
2.3	Fabricación de Cojinetes Autolubricados.	19
2.3.1	Obtención de los Polvos Metálicos.	20
2.3.2	Compactación.	24

2.3.3	Sinterización.	25
2.3.3.1	Proceso de Difusión.	25
2.3.3.2	Mecanismos de la Difusión	26
2.3.3.3	Mecanismo Cíclico.	27
2.3.3.4	Mecanismo de Aglomeración.	28
2.3.3.5	Mecanismo de Vacancia.	28
2.3.3.6	Mecanismo Internodal	29
2.3.3.7	Probabilidad de saltos debidos a la fluctuación de energía.	32
2.3.3.8	Ecuación de Difusión.	34
2.3.4	Etapas de la Sinterización.	37
2.3.4.1	Mecanismos de la Sinterización	39
2.3.4.2	Hornos para Sinterización.	44
2.3.5	Calibración.	46
2.3.6	Mecanizado.	47
2.3.7	Impregnación.	47
2.4	Características típicas de los Cojinetes Autolubricados.	48
2.5	Cambio Dimensional.	50
CAPÍTULO III	METODOLOGÍA	51
3.1	Introducción	51
3.2	Obtención y preparación de probetas de la nueva aleación $92\text{Cu}8\text{Zn}1\text{Zn}(\text{C}_{10}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$.	53
3.2.1	Número de muestras	53
3.2.2	Polvos Metálicos	56
3.2.3	Forma de las probetas	56
3.2.4	El Mezclado	58
3.2.5	La Compactación	58

3.2.6	El Sinterizado	59
3.2.7	La Calibración	59
3.3	Análisis, Ensayos y Datos	59
3.3.1	Análisis granulométrico	59
3.3.2	Análisis Químico	61
3.3.3	Ensayo de Carga radial	62
3.3.4	Factor de Resistencia a la rotura radial	62
3.3.5	Ensayo de Cambio dimensional	64
3.3.6	Microscopía Óptica	65
CAPÍTULO IV	RESULTADOS	80
4.1	Introducción	80
4.2	Curvas del Factor de resistencia a la rotura radial.	81
4.2.1	Tratamiento de sinterizado	81
4.2.2	Regresión Múltiple del Factor de resistencia a la rotura radial.	87
4.3	Curvas del cambio dimensional en el diámetro exterior	91
4.3.1	Tratamiento de sinterizado.	91
4.3.2	Regresión Múltiple del Cambio dimensional en el diámetro exterior.	96
4.4	Curvas del Cambio dimensional en el diámetro interior	100
4.4.1	Tratamiento de sinterizado.	100
4.4.2	Regresión Múltiple del Cambio dimensional en el diámetro interior.	105

4.5	Curvas del Cambio dimensional en la longitud	109
4.5.1	Tratamiento de sinterizado.	109
4.5.2	Regresión Múltiple del Cambio dimensional en la longitud	114
4.6	Modelamiento matemático empírico.	118
4.6.1	Modelo matemático empírico MC1	119
4.6.2	Modelo matemático empírico MC2	120
4.6.3	Modelo matemático empírico MC3	121
4.6.4	Modelo matemático empírico MC4	122
	CONCLUSIONES	124
	RECOMENDACIONES	127
	BIBLIOGRAFÍA	128

Prólogo

Esta tesis la presento para el Grado Académico de Doctora en Ingeniería Industrial en la Facultad de Ingeniería Industrial de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. La investigación aquí descrita fue realizada a dedicación exclusiva y con recursos propios desde el año 2004 hasta el 2007 inclusive.

Un reconocimiento especial a Manuel Alejandro Alvarado Calderón y Marco Antonio Alvarado Calderón por la elaboración de los gráficos.

Marilú Calderón

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO.

1.1 Situación Problemática

Nuestro país es gran productor de cobre y zinc, los cuales son obtenidos aplicando técnicas de concentraciones metalúrgicas. Gran parte de estos concentrados los exportamos a países industrializados que los tratan para obtener los metales cobre y zinc, para formar aleaciones (fig. 1.1), generando de esta manera productos que tienen alta demanda en el mercado por su aplicación industrial.

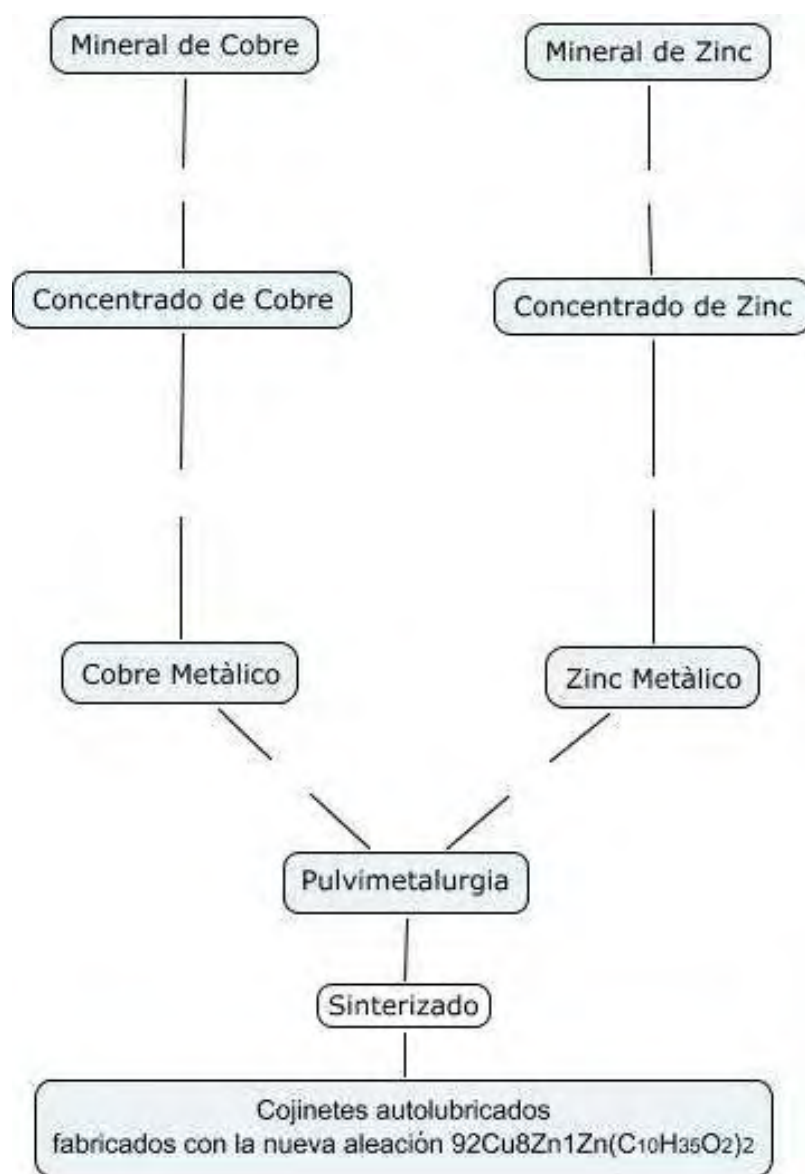


Fig. 1.1 Proceso de obtención de la aleación sinterizada $92\text{Cu}8\text{Zn}1\text{Zn}(\text{C}_{10}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$
Fuente: Elaboración propia.

En el Perú se fabrican cojinetes de cobre y estaño y es posible fabricarlos con cobre y zinc, para darle un valor agregado a los metales cobre y zinc. Nuestros concentrados de cobre y zinc ya no los exportaríamos así, sino como cojinetes autolubricados, con los cuales obtendríamos mayor beneficio económico para nuestro país y sobre todo generar nuevos puestos de trabajo.

América Latina y Perú como parte de ella está inmerso en los procesos modernos de fabricación de equipos y maquinarias en donde se ejercen cada vez mayor exigencia a los fabricantes con respecto a la calidad, costos y oportunidad de entrega, dado que los ciclos de producción tienden a ser más cortos y exigen respuestas rápidas de los fabricantes de las mencionadas piezas.

El factor más importante de estos procesos es desarrollar innovaciones tecnológicas y lograr una gran producción de lotes de piezas de precisión, con materiales o mezclas poco comunes controlando el coeficiente de rotura, el cambio dimensional, la densidad y la porosidad.

A nivel mundial se han desarrollado una gran variedad de aleaciones fundidas para ser utilizadas como material en la producción de cojinetes de deslizamiento, casquillos, etc., para diferentes equipos y repuestos en diversas ramas de la industria [40].

Por otro lado los principales fabricantes [3, 4, 44], en la actualidad utilizan materiales sinterizados en lugar de aleaciones fundidas con el fin de reducir los costos de procesos. Este proceso es más efectivo para la elaboración de piezas de diferente composición química con buenas propiedades y permite emplear más efectivamente la capacidad instalada produciendo la cantidad requerida y no necesariamente todo un lote como en el caso de producir mediante aleaciones.

1.2 Problema de Investigación

1.2.1 Problema general

¿De que manera el proceso de sinterizado y la formulación de los modelos el coeficiente de rotura y el cambio dimensional pertinentes de la nueva aleación $92\text{Cu}_8\text{Zn}_1\text{Zn}(\text{C}_{10}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$ constituyen una alternativa para la fabricación de cojinetes autolubricados, acorde a las normas internacionales de calidad?

1.2.2 Problemas Específicos

- 1 ¿Cual es el proceso de sinterizado más adecuado de la nueva aleación sinterizada $92\text{Cu}_8\text{Zn}_1\text{Zn}(\text{C}_{10}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$ para la fabricación de cojinetes autolubricados?.
- 2 ¿Cómo determinar el coeficiente de rotura, y el cambio dimensional pertinentes de la nueva aleación sinterizada $92\text{Cu}_8\text{Zn}_1\text{Zn}(\text{C}_{10}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$ acorde a las normas de internacionales de calidad?.
- 3 ¿Cómo formular los modelos matemáticos empíricos del coeficiente de rotura y del cambio dimensional de la nueva aleación $92\text{Cu}_8\text{Zn}_1\text{Zn}(\text{C}_{10}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$?

1.3 Justificación

El Cu y Zn son metales que los obtenemos de nuestras minas mayormente son exportados en forma de concentrados. Es así que nace la idea de darle un valor agregado a estos metales con la fabricación de cojinetes autolubricados, para lo cual es necesario determinar la viabilidad de obtener la proporción adecuada de la nueva aleación, el proceso de sinterizado, el cambio dimensional y las propiedades

pertinentes y los resultados positivos de esta investigación nos permitirán participar en un mercado internacional altamente competitivo.

La investigación a realizar consistirá en evaluar las variables del proceso de sinterización y la formulación de los modelos matemáticos empíricos del coeficiente de rotura y del cambio dimensional de la nueva aleación sinterizada $92\text{Cu}8\text{Zn}1\text{Zn}(\text{C}_{10}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$ para la fabricación de cojinetes autolubricados.

Asimismo se generaría empleo, dado que seríamos fabricantes de cojinetes autolubricados con la nueva aleación de cobre y zinc acorde a las normas internacionales, de esta manera nuestro país estaría a la vanguardia del desarrollo tecnológico.

1.4 Objetivos de la investigación.

1.4.1 Objetivo general.

Determinar el proceso de sinterizado y formular los modelos matemáticos empíricos del coeficiente de rotura y del cambio dimensional pertinentes de la nueva aleación $92\text{Cu}8\text{Zn}1\text{Zn}(\text{C}_{10}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$ y que se constituya como una alternativa para la fabricación de cojinetes autolubricados, acorde a las normas internacionales de calidad.

Objetivos específicos.

2. Determinar el proceso de sinterizado óptimo de la nueva aleación sinterizada $92\text{Cu}8\text{Zn}1\text{Zn}(\text{C}_{10}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$ para la fabricación de cojinetes autolubricados.

3. Determinar el coeficiente de rotura y el cambio dimensional pertinentes de la nueva aleación sinterizada $92\text{Cu}8\text{Zn}1\text{Zn}(\text{C}_{10}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$ acorde a las normas internacionales de calidad.
4. Formular los modelos matemáticos empíricos del coeficiente de rotura y del cambio dimensional pertinentes de la nueva aleación $92\text{Cu}8\text{Zn}1\text{Zn}(\text{C}_{10}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$ para que se constituya como una alternativa para la fabricación de cojinetes autolubricados,

1.4 Hipótesis de la Investigación.

1.5.1 Hipótesis general.

La nueva aleación $92\text{Cu}8\text{Zn}1\text{Zn}(\text{C}_{10}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$ tiene el proceso de sinterizado adecuado, el Coeficiente de Rotura y el Cambio Dimensional para que se constituya como una alternativa para la fabricación de cojinetes autolubricados, acorde a las normas internacionales de calidad.

1.5.2 Hipótesis específicas

1. La nueva aleación sinterizada $92\text{Cu}8\text{Zn}1\text{Zn}(\text{C}_{10}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$ tiene el proceso de sinterizado más adecuado para fabricar cojinetes autolubricados.
2. La nueva aleación sinterizada $92\text{Cu}8\text{Zn}1\text{Zn}(\text{C}_{10}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$ tiene el Coeficiente de Rotura y el Cambio Dimensional pertinentes que cumple con las normas internacionales de calidad.

3. La formulación del modelo del coeficiente de rotura y del cambio dimensional pertinentes de la nueva aleación $92\text{Cu}8\text{Zn}1\text{Zn}(\text{C}_{10}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$ constituye una alternativa para la fabricación de cojinetes autolubricados,

1.6 Variables

1.6.1 Variables dependientes.

Se han definido cuatro variables dependientes:

- Temperatura de Sinterización.
- Tiempo de Sinterización.
- % de Cobre.
- % de Zinc

1.6.2 Variables independientes.

Se han definido cuatro variables independientes:

- Coeficiente de rotura.
- % Cambio dimensional en el diámetro exterior.
- % Cambio dimensional en el diámetro interior.
- % Cambio dimensional en la longitud

1.6.3 Indicadores e índices.

INDICADORES	ÍNDICES
a) Cuantitativos <ul style="list-style-type: none">- Variación del Coeficiente de rotura- Variación dimensional en el diámetro exterior.- Variación dimensional en el diámetro Interior- Variación dimensional en la longitud.- Densidad.- Porosidad b) Cualitativos <ul style="list-style-type: none">- Microestructura.	<ul style="list-style-type: none">- Análisis de Varianza.- Correlaciones.- Modelos:<ul style="list-style-type: none">- Coeficiente de rotura.- .% Cambio dimensional en el diámetro exterior.- % Cambio dimensional en el diámetro interior.- % Cambio dimensional en la longitud.

1.7 Tipo de investigación.

La presente investigación es cuantitativa en la cual se ha considerado el desarrollo de una nueva aleación sinterizada $92\text{Cu}8\text{Zn}1\text{Zn}(\text{C}_{10}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$.

1.8 Diseño de la investigación.

La hipótesis de la nueva aleación sinterizada $92\text{Cu}8\text{Zn}1\text{Zn}(\text{C}_{10}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$ elegida a partir de una investigación experimental será una alternativa de fabricación de cojinetes autolubricados, la cual se contrastará considerando lo siguiente:

- Preparación de probetas.
- Compactación.
- Sinterización.
- Calibración.
- Impregnación

En esta investigación se tendrá en cuenta lo siguiente:

- La composición química.
- La presión de compactación
- La temperatura de sinterizado.
- El tiempo de sinterizado.
- La atmósfera del proceso de sinterizado.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

2.1 La Pulvimetalurgia

2.1.1 Conceptualización

La pulvimetalurgia o Metalurgia de Polvos se define [7, 19] como un proceso de fabricación de diversas piezas entre las cuales los cojinetes autolubricados se obtienen con mejores propiedades que los que resultan aplicando la tecnología de fundición. La pulvimetalurgia permite el control de los elementos de aleación y de la porosidad adecuada para alojar el lubricante, de esta manera los cojinetes pueden trabajar sin lubricación adicional.

2.1.2 Antecedentes.

Los primeros usos de polvos metálicos han sido rastreados en varios lugares [30, 39]. Por ejemplo, los Egipcios utilizaron polvos de acero en el año 3000 AC. Otro ejemplo de uso temprano es la Columna de Delhi en la India en el año 300 DC. Esta columna fue hecha de 6.5 toneladas de acero en polvo, durante el siglo XIX se inicio el uso de técnicas de Pulvimetalurgia. La necesidad de aparatos de platino de laboratorio llevaron desarrollo de precipitación química de polvos y nuevas rutas de consolidación sin el uso de altas temperaturas. Tales actividades ocurrieron en Rusia e Inglaterra donde polvos precipitados fueron trabajados en caliente para superar la incapacidad de obtener las altas temperaturas para recubrir platino.

El científico ruso P. Sobolevsky, en 1827 empleó por primera vez el método de fabricar monedas prensando, sinterizando y forjando polvos de platino, al mismo tiempo, se fabricaban monedas de polvos de cobre, plata y plomo acuñadas y sinterizadas.

En 1829, Woolaston publicó un artículo en el cual describía el proceso para producir platino compacto a partir de polvo obtenido en forma de esponja de platino, considerada la primera investigación científica en el campo de la metalurgia de polvos, esto estableció los fundamentos de las técnicas modernas.

Más tarde, en 1900, se descubre el osmio, que Auer Von Welsbach aplicó a la fabricación de filamentos de lámparas. Los polvos se aglutinaban y trefilaban y luego se sinterizaban por el paso directo de la corriente. A partir de 1910 se substituye el osmio por el wolframio, obtenido por el mismo procedimiento, poco después, en 1920, se empezaron a fabricar bronce porosos autolubricantes para la industria de la automoción

El mayor avance de esta tecnología fue en 1923, con la aparición de las aleaciones de carburo de tungsteno aglomeradas con cobalto, comercializadas desde 1930 por Krupp bajo el nombre de Widia, de gran utilidad como herramienta de corte. Se desarrollaron también rodamientos porosos de bronce y contactos eléctricos de grafito-cobre y el acero sinterizado aparece en 1936 en donde adquiere gran interés comercial.

La pulvimetalurgia creció desde una base de materiales, formando elementos comunes como el cobre y hierro por medio de una tecnología de menor costo.

Al llegar a los años 40, la pulvimetalurgia estaba involucrada en la fabricación de nuevas aleaciones de tungsteno, aleaciones estructurales férreas y metales refractarios y sus aleaciones (Nb, W, Mo, Zr, Ti y Re).

En los años 70 se inició la producción de aleaciones especiales [26], compactación isostática en caliente, aceros para herramientas sinterizadas.

El crecimiento de metales estructurales ha avanzado igual en el período. La mayoría de las piezas estructurales producidas de polvos son a base de hierro. Igual de emocionante ha sido la evolución de las aplicaciones. Inicialmente, componentes a base de polvos fueron seleccionados simplemente por su bajo costo. Más reciente, la principal razón de seleccionar una ruta de la pulvimetalurgia ha sido asociada con el mejoramiento de la calidad, homogeneidad o propiedades en conjunto de costo atractivo y productividad.

Las superaleaciones de altas temperaturas de níquel, la dureza específica de aleaciones de aluminio para aeronaves y compuestos de aluminio con expansión térmica controlada son algunos buenos ejemplos de esta evolución. No solo podrán ser fabricados con mejor economía de material por medio de polvos, sino también por nuevas y mejores composiciones que están siendo desarrolladas así aprovechando el control químico y de la micro estructura. La expansión de los

procesos de la pulvimetalurgia en las áreas que requieren materiales de alta calidad y propiedades únicas crearán más oportunidades para el futuro.

Desde 1980 [30] a la actualidad se vienen desarrollando Técnicas de solidificación rápida y tecnología de moldeo por inyección de piezas muy pequeñas y complejas empleadas en la electrónica y en la medicina .

2.1.3 Ventajas de la Pulvimetalurgia.

El proceso de fabricación por pulvimetalurgia proporciona las siguientes Ventajas [15]

- El Tiempo de fabricación es corto y costos reducidos.
- No se desperdicia material, puesto que sólo se usa la cantidad de polvo requerida para alcanzar el peso final.
- Es más fácil el control de la composición química exacta.
- Precisión dimensional y buen acabado.
- Piezas imposibles por otros técnicas, se logran aplicando esta técnica que permite posible controlar la porosidad, mezcla metales y no metales (cerámicos).
- Se evitan las segregaciones de aceros de alta aleación como en el caso de los aceros rápidos, que segregan bandas de carburos .
- Se logra buenos acabados superficiales, sin rebabas ni líneas de partición propias del moldeo.
- Actualmente las operaciones pulvimetalúrgicas están automatizadas

2.2 Materiales Sinterizados.

Los componentes pulvimetalúrgicos siguen disfrutando de una aceptación cada vez mayor en muchos ámbitos de la técnica debido fundamentalmente a su gran rentabilidad y flexibilidad funcional [14]. Estos se caracterizan por una gran

precisión en la forma obtenible con frecuencia sin necesidad de tratamiento posterior, incluso en el caso de complicadas formas geométricas y por una gran diversidad de aleaciones específicas, así como por sus muy diferentes grados de densidad, que abarcan desde aleaciones muy porosas hasta muy densas.

A lo largo de la última década se han ido desarrollando multitud de nuevos componentes pulvimetalúrgicos para el sector del automóvil, la aeronáutica, la astronáutica, la construcción de máquinas y la industria eléctrica: piezas sinterizadas de hierro y acero de alta densidad y resistencia, cojinetes sinterizados autolubrificantes, filtros sinterizados, materiales de fricción, piezas moldeadas por inyección de gran complejidad. metales duros sinterizados para herramientas de corte y piezas de desgaste con capas adicionales de materiales duros, herramientas de diamante de extrema dureza, así como también productos pulvimetalúrgicos semiacabados, por ejemplo acero rápido con metales pesados, superaleaciones y herramientas de diamante revestidas para la elaboración de circuitos impresos.

En los últimos años se ha ido implantando cada vez más el moldeo por inyección de metal. Un área que, según estimaciones realistas, ha registrado incrementos anuales de más del diez por ciento, superando con ello, desde hace tiempo, la barrera de los mil millones de euros en el volumen de ventas. Otro área que también progresa con fuerza es el de la fabricación de componentes de aluminio de alto rendimiento mediante tecnologías pulvimetalúrgicas. Los ingenieros valoran las buenas cualidades de este material, así como la precisión en la forma y medidas de los componentes pulvimetalúrgicos a base de aluminio.

También sigue creciendo el área de los imanes fabricados a partir de procedimientos pulvimetalúrgicos (por ejemplo imanes de tierras raras a base de neodimio-hierro-boro –Nd-Fe-B–). Gracias fundamentalmente a estos materiales han sido posibles grandes mejoras en el campo de las telecomunicaciones, la técnica de control y regulación, propulsión, construcción de vehículos y técnica de medición, además de otros campos como el diagnóstico médico.

Todas estas aplicaciones han contribuido a que el sector de la pulvimetalurgia siga creciendo en contraste con la tendencia observada en otros sectores de la técnica. Las tasas de crecimiento, que en muchas áreas alcanzan cifras de dos dígitos, muestran el empuje con que este innovador sector encara el futuro. La producción anual mundial de los productos pulvimetalúrgicos mencionados (cerámica no incluida) se cifra en más de 30.000 millones de euros. La parte más importante, unos 14.000 millones de euros, corresponde a los metales duros. En todo el mundo se fabrican componentes pulvimetalúrgicos a base de hierro por valor de más de 6.000 millones de euros, correspondiendo aprox. una cuarta parte de ellos a Europa. Alemania ocupa alrededor del 29 por ciento del mercado europeo de componentes pulvimetalúrgicos a base de hierro. Los mercados asiáticos han sido los que más han crecido en los últimos tres años (con alrededor del 33 por ciento del mercado) frente a EE.UU., que lidera el mercado mundial (40 por ciento).

El sector Pulvimetalúrgico se encuentra bajo una fuerte presión debido al drástico aumento de precios de las materias primas y energía desde el año 2004. Contando a partir del primer trimestre de 2004, los precios de las materias primas han subido en el año 2005 aprox. un 15 por ciento en el caso de los polvos metalúrgicos de baja aleación, y hasta un 50 por ciento en los de alta aleación. En 2006 se esperan nuevas subidas de hasta el diez por ciento en el precio de los polvos metalúrgicos.

En el aspecto energético, se prevé que en 2006 aumenten asimismo los precios del gas (un 30 por ciento) y de la electricidad (un 25 por ciento). “La evolución seguida por los mercados de materias primas y energía supone una seria amenaza para las empresas del sector pulvimetalúrgico”, afirmó Heinz-Joachim Mäurer, presidente de la Asociación Profesional de Pulvimetalurgia (Fachverband Pulvermetallurgie). “Nuestros métodos de fabricación y procesos de producción son ya de por sí muy eficientes. Nosotros, los proveedores, no podemos hacer frente a este nuevo aumento de los costes de producción. Debemos iniciar un diálogo constructivo con nuestros clientes. En este sentido seguimos siendo fiables, ofreciendo soluciones innovadoras y de alta calidad.” Por su lado, Eugen Egetenmeir, miembro de la gerencia de Messe

München, comentó que Cermitec 2006 ofrece una plataforma de negocios ideal para hacer posible este diálogo entre los profesionales con poder de decisión del sector y sus clientes.

2.2.1 Concepto de Material Sinterizado.

El material sinterizado es una sustancia compuesta por dos o más metales en forma de polvo seco, que se obtiene por pulvimetalurgia [6], la que ha alcanzado gran importancia en la preparación de materiales con características especiales. En este proceso, se los preparan mezclando los insumos secos en polvo, compactándolos a alta presión y calentándolos después a temperaturas justo por debajo de su punto de fusión. El resultado es una material sólido y homogéneo. Los productos hechos en serie pueden prepararse por esta técnica abaratando mucho su costo.

2.2.2 Tipos de Materiales Sinterizados y sus aplicaciones.

La pulvimetalurgia permite obtener aleaciones a base de hierro, cobre, estaño, aluminio níquel y titanio, siendo las más conocidas Los aceros al carbono, los aceros para herramientas, matricería y forja, los aceros inoxidables, los bronce y los latones partiendo de polvos metálicos y polvos prealeados [47].

Existen razones suficientes [17] para asegurar que, la fabricación por pulvimetalurgia proporciona mejores propiedades a los grupos de materiales de los componentes de ingeniería que se describen a continuación [13]:

2.2.2.1 Materiales Refractarios.

Estos metales refractarios poseen particularmente un alto punto de fusión, son muy difíciles de producir por fusión y moldeo y la pulvimetalurgia es una alternativa para la fabricación de materiales como por ejemplo el tungsteno,

molibdeno, tántalo y todos los metales que están dentro de esta categoría de refractarios.

2.2.2.2 Materiales Compuestos.

Estos materiales están formados por dos o más metales que son insolubles en estado líquido o la mezcla de éstos son sustancias no metálicas tales como óxidos y otros materiales refractarios como por ejemplo:

- Materiales de contacto eléctrico como Cobre-Tungsteno, Plata-Óxido de Cadmio.
- Metales duros como los carburos cementados usados para herramientas de corte, piezas resistentes al desgaste como matrices para trefilado de alambre y herramientas para la forja de materiales. Los carburos de cobalto con tungsteno fueron los primeros de esta clase de materiales, más recientemente los nitruros, los carbonitruros y los boruros se ha incrementado su uso, y los sustitutos del escaso y caro cobalto los han comenzado a reemplazar por el níquel, Níquel-Cobalto, Níquel-Cromo, superaleaciones a base de Níquel y aceros complejos.
- Materiales de fricción para forro de frenos y revestimiento de embragues en donde abrasivos son recubiertos en cobre u otra matriz metálica.
- Herramientas diamantadas para corte especialmente ruedas para moler en donde pequeños diamantes son dispersados en una matriz metálica.
- Actualmente muchos materiales que contienen fases de no metálicos dispersados finamente han sido investigados y puestos en servicio. Estas fases dispersadas son partículas de óxidos que tienen una especial resistencia mecánica y una elevada temperatura de trabajo.

2.2.2.3 Materiales porosos.

Muchas aleaciones fundidas a base de hierro y de cobre son porosas por defecto de fabricación pero, en los materiales sinterizados esta porosidad es variable y

beneficiosa. Los principales productos de este grupo son los filtros y los cojinetes autolubricados. Estos últimos son los mejores productos de la pulvimetalurgia.

Los cojinetes autolubricados pueden emplearse prácticamente en todo el espectro de las aplicaciones industriales y de la ingeniería [43], caracterizándose especialmente por no necesitar de un mantenimiento permanente, porque en su interior contiene el aceite necesario para su funcionamiento.

Los cojinetes porosos autolubricados se usan generalmente en aquellos casos en que los equipos trabajan a baja velocidad y esfuerzos moderados.

El advenimiento de este tipo de material con propiedades autubricantes, ha provocado un cambio tecnológico en la industria mecánica por poseer las siguientes características:

1. Los cojinetes autolubricados evitan:
 - Hacer ranuras y canales de lubricación en los cojinetes macizos.
 - La presencia de aceiteras y graseras en las máquinas.
 - Las pérdidas y salpicaduras de aceite.
 - El mantenimiento permanente en lugares a veces inaccesibles.
 - El agripamiento del cojinete por falta de lubricación.
2. Los cojinetes porosos ofrecen las siguientes ventajas:
 - Reducción en el consumo de lubricantes.
 - Marcha silenciosa durante la partida y funcionamiento de la máquina.

El uso de los cojinetes porosos se extiende hoy en día en todas las ramas de la industria tales como: La construcción de máquinas, construcción de automóviles, construcción aeronáutica, construcción de equipos locomotores, construcción de máquinas-herramientas, construcción electromecánica (cojinetes para pequeños ventiladores, aparatos domésticos, aspiradoras, refrigeradoras, lavadoras, calculadoras etc.), construcción de máquinas agrícolas, construcción de elevación y

transporte de carga, construcción de aparatos de precisión y otras diversas aplicaciones (cojinetes para patines, bicicletas, etc.) [18].

Los fabricantes de cojinetes autolubricados realizan investigación respecto a estos materiales, pero el acceso a la información es restringido.

2.2.2.4 Aleaciones para Piezas Estructurales.

Las piezas estructurales son los componentes de máquinas y mecanismos utilizadas en toda la industria electrónica, médica, mecánica, textil, alimenticia, minera, etc.

Es el grupo más grande y consiste en piezas fabricadas de aleaciones a base de hierro, de cobre, de bronce, de latón, de aluminio, de metales raros como berilio y de titanio. Estas piezas fabricadas por pulvimetalurgia tienen la gran ventaja de ser económicas y de precisión dimensional.

2.2.2.5 Aleaciones Especiales.

La producción por metalurgia de polvos de aleaciones especiales está creciendo muy rápidamente debido a que se obtienen excelente resistencia mecánica y alta velocidad de corte. Las aleaciones que pertenecen a este grupo son las que son a base de níquel y de cobalto. La ventaja de este procedimiento es que se obtiene una estructura uniforme que mejora las propiedades mecánicas y en el caso de las herramientas de corte y resistentes al desgaste prolonga su vida útil.

2.3 Fabricación de Cojinetes Autolubricados.

Los productos metálicos porosos representan el ejemplo mas importante de la obtención de efectos estructurales fuera de lo común en los metales, gracias a la aplicación de procesos de Metalurgia de Polvos y lo cierto es que, solamente a través

de esa técnica se obtienen materiales metálicos cuya principal característica es la presencia de poros.

Dentro de los metales porosos, los Cojinetes Autolubricados ocupan un lugar destacado, debido principalmente a su gran diversidad de aplicaciones.

El proceso consiste en prensar a presiones de hasta 7.000 kg. por cm² [16], la mezcla de metales en polvos de las características y granulometría necesarias para darle las propiedades definitivas a la pieza que ya se obtiene de la forma y dimensiones deseadas.

En un paso siguiente las piezas así logradas se sinterizan en hornos especiales de alta temperatura bajo atmósfera controlada provocando la aleación de los componentes y dándoles las características definitivas de resistencia y dureza. De ser necesario posteriormente se puede realizar el calibrado o maquinado, así como lograr la terminación final que se desee.

Los productos obtenidos por metalurgia de polvos las operaciones básicas de fabricación de los cojinetes porosos son [17]:

2.3.1 Obtención de los Polvos Metálicos.

Los polvos metálicos se obtienen por atomización y son clasificados según el tamaño granulométrico adecuado para cada aplicación.

La atomización ha sido aplicada a la producción de polvos de estaño, plomo, zinc, cadmio, cobre y bronce y consiste, en general, en proyectar un chorro de metal o de aleación fundida contra un fluido (aire o agua) (fig 2.1).

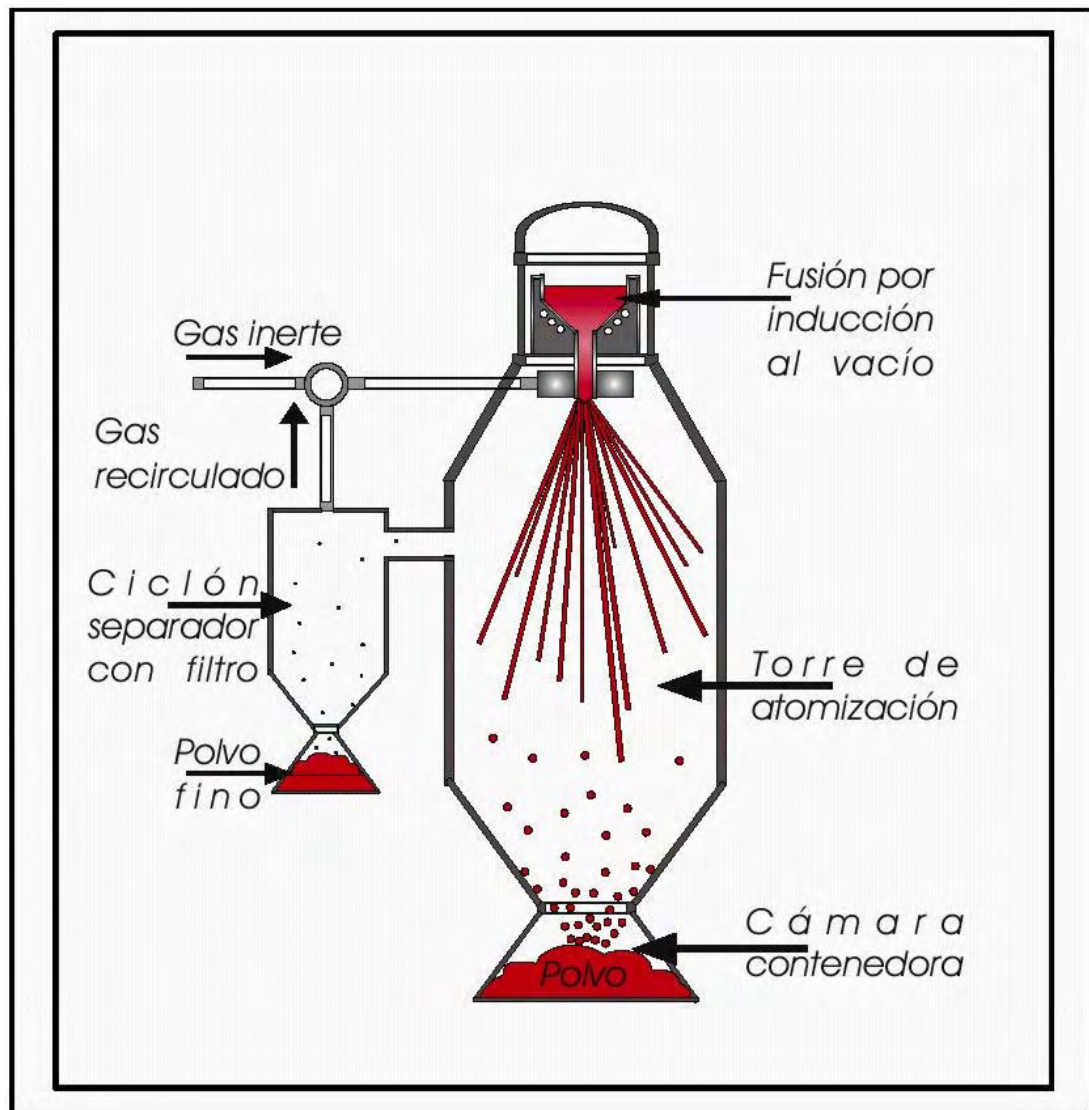


Fig. 2.1 Atomización con gas

Fuente: Rivera, J. Juárez, A. Sánchez de Jesús, F. (2006)

En la atomización cabe tener en cuenta, como variables importantes del proceso, a la temperatura y régimen del metal fundido, la temperatura, la naturaleza y presión del fluido y otros factores procedentes del diseño, como las dimensiones de la tobera, la altura de la caída, etc.

Debido a la súbita solidificación que tiene lugar, el metal aparece en forma pulverulenta. A continuación se recoce [2] la masa así formada en atmósfera

reductora, a fin de eliminar el óxido superficial que se haya formado producto del enfriamiento violento.

El tamaño de la partícula queda definido por sus dimensiones. En el caso de partículas esféricas, el tamaño se expresa mediante el diámetro. Cuando se trata de partículas no esféricas, se aplica el concepto de diámetro medio, cuya definición depende del método escogido para su determinación. Por ejemplo si se emplea el tamizado, se expresa el diámetro medio en términos de la malla; si se usa la medición con el microscópico, se recurre a la media de varias dimensiones; etc.

El tamizado consiste en la separación de partículas mediante tamices de distinta malla que las dejan pasar o las retienen. Es el método más empleado para determinar la granulometría de las partículas. Los tamices más divulgados son los que se adaptan a la escala de Tyler (Fig.2.2), recomendada por las normas ASTM. Se trata de tamices de malla de tejido de alambre, cuyo número Tyler indica la cantidad de mallas por pulgada lineal.

El tamizado suele realizarse colocándo 100 gr. de polvo en una tamizadora automática provista de un juego de tamices de distinta abertura y que se deja zarandear unos 15 minutos. El resultado se expresa como porcentaje de polvo retenido en cada tamiz. Por ejemplo “40% +140 –120” significa que el 40% , en peso, del polvo pasa por el tamiz Tyler 140 pero es retenido por el 120. De esta forma se determina el diámetro máximo, en lugar del medio, de cada fracción que pasa por un tamiz o el mínimo de la fracción retenida. El tamaño del polvo puede ser de 50 a 300 micrones que corresponde a malla Tayler de +100 a -325.



Fig.2.2. Tamices TYLER.
Fuente: Mallqui, R (2006)

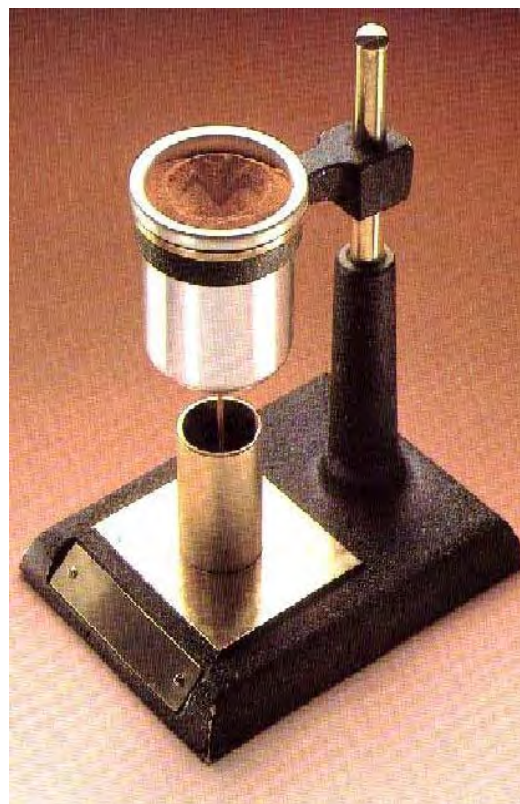


Fig. 2.3. Flujómetro HALL.
Fuente: Mallqui, R (2006)

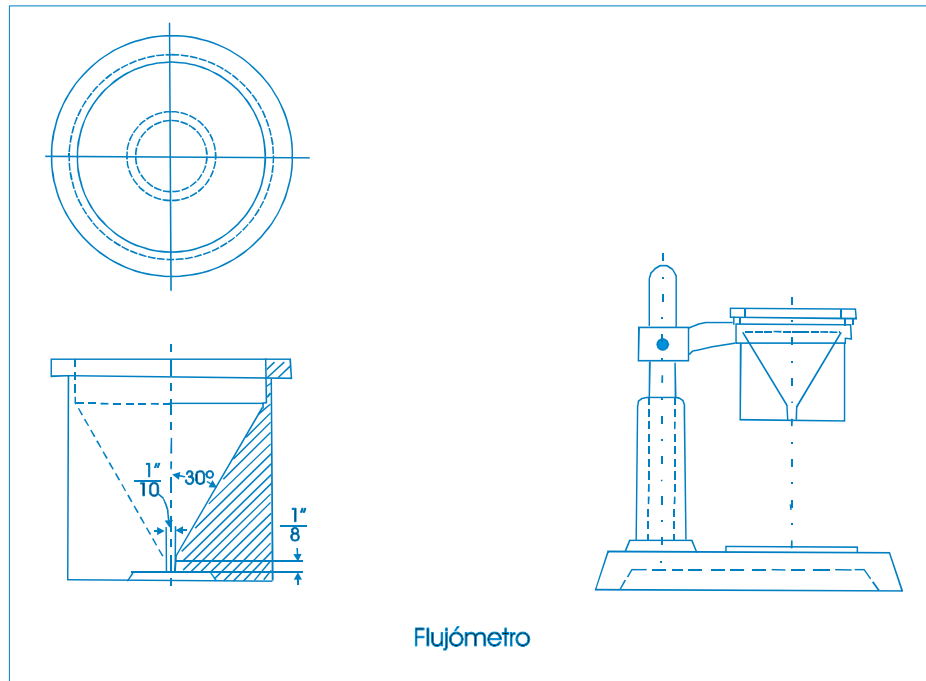


Fig. 2.4. Características del Flujómetro HALL.
Fuente: Hausner, (1973)

Posteriormente al tamizado se realiza la prueba de flujo empleando el Flujómetro HALL (Fig. 2.3 y 2.4) [20] .

2.3.2 Compactación.

Una vez obtenidos los polvos metálicos, su manipulación está encaminada a facilitar las etapas de la compactación, de la sinterización y a mejorar las propiedades del cojinete acabado.

Debido a la gran afinidad metal-oxígeno, al trabajar los polvos metálicos es preciso evitar la oxidación con el embalaje en recipientes herméticos, cerrados al vacío o con gas inerte; el almacenaje en locales aclimatados con humedad controlada, etc. Con respecto al cuidado de la salud de los operadores es necesario tomar las siguientes precauciones [27]:

- Materiales finos cuando son expuestos al aire se pueden quemar espontáneamente ocasionando explosiones.
- Algunos metales pueden ser cancerígenos.
- Grandes cantidades de materiales muy finos presente en el medio ambiente pueden ser inhalados durante una respiración normal. Pudiendo entrar en los alveolos pulmonares causando fibrosis.
- Usar respiradores o máscaras especiales cuando se pesa o se muele materiales particulados.
- Evitar comer o beber donde los materiales particulados son manipulados.
- Cargar los polvos reactivos con cuidado.
- Verificar que los extractores estén dimensionados para la área y la cantidad de material utilizado.

2.3.3 Sinterización.

La sinterización es el tratamiento térmico de un polvo metálico compactado a una temperatura inferior a la temperatura de fusión [4, 32]. Tiene el propósito de incrementar la resistencia de la pieza creando puentes de enlaces fuertes entre las partículas, debido a que ocurre una difusión atómica [11, 44] y las partes unidas durante la compactación se fortalecen y crecen hasta formar una pieza uniforme. Esto puede inducir a un proceso de recristalización y a un incremento en el tamaño de grano.

Después del tratamiento de sinterizado realizado a las piezas se les pueden hacer tratamientos térmicos.

2.3.3.1 Proceso de Difusión.

La difusión en los metales es el desplazamiento de los átomos en un cuerpo cristalino a distancias que superan las medidas interatómicas de la sustancia dada [24]. Si estos desplazamientos no están vinculados con el cambio en la concentración en

volúmenes aislados, entonces dicho proceso se denomina autodifusión que es el desplazamiento de los átomos en un metal puro. La difusión que va acompañada de un cambio de concentración se da en las aleaciones y en los tratamientos termoquímicos, recibe el nombre de heterodifusión. La difusión que provoca una recrystalización fásica (formando nuevas fases), con frecuencia se denomina reactiva o de reacción. Este tipo de difusión ocurre al saturar el acero con nitrógeno [12], cromo, silicio, carbono, etc

Como base de la difusión en los metales sirve el proceso atómico en el cual todo átomo efectúa movimientos al azar, es decir, una serie de saltos entre las diferentes posiciones de equilibrio en la red cristalina. La noción de “difusión” no se aplica a los átomos aislados, sino que a un flujo macroscópico de la sustancia. Las traslaciones macroscópicas de la sustancia son el resultado de un enorme número de traslaciones pequeñas de átomos aislados. La fuerza motriz de la difusión es el gradiente del potencial químico $d\mu/dx$, el cual puede ser causado por diferentes motivos. Con respecto a los tratamientos termoquímicos el gradiente del potencial químico está predeterminado por el gradiente de concentración dc/dx . Si $dc/dx \neq 0$, el movimiento térmico de los átomos se hace orientado hacia la igualación de las concentraciones (durante la autodifusión los átomos de la misma clase se trasladan igual que los de la composición inicial).

En el sistema de dos o más componentes la difusión es posible únicamente si uno de los componentes es soluble en el otro.

2.3.3.2 Mecanismos de la difusión.

Para describir el proceso de difusión en un cuerpo cristalino (de metal) hay muchas interpretaciones del mecanismo de difusión pero, sólo examinaremos cuatro mecanismos principales [12].

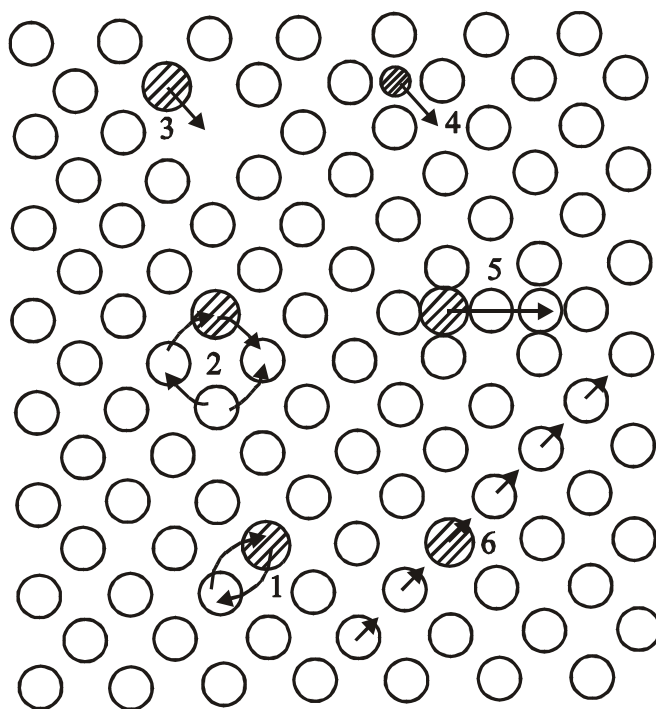


Fig. 2.5 Esquema de diferentes mecanismos de la difusión en los metales:
1. de intercambio; 2. anular; 3. de vacancias; 4 y 5, internodal (directo y por desalojamiento); 6. de aglomeración (crowd).

2.3.3.3 Mecanismo cíclico (de intercambio).

Al realizarse este mecanismo (fig. 2.5), unos cuantos átomos (tres o más) situados más o menos en círculo se mueven coordinadamente de modo que todo el aro de átomos da vuelta a una distancia interatómica. Un caso particular del mecanismo cíclico es el de intercambio, en el que se produce el intercambio directo de sitios entre dos átomos vecinos. En los cristales con estructura de empaquetamiento denso de átomos, es poco probable causar deformaciones notables en la red debido a este mecanismo.

2.3.3.4 Mecanismo de aglomeración (crowd).

El crowd es un grupo de átomos aglomerados o acumulados, comúnmente a lo largo de un empaquetamiento denso, debido a la presencia en la fila de uno o varios átomos excesivos.

Cada uno de los átomos de esta fila, incluso los apartados del átomo sobrante a unas diez distancias interatómicas, está desplazado a cierta distancia respecto a la posición de equilibrio de la red. La configuración de aglomeración o crowd puede trasladarse a lo largo de la fila, pues la distorsión se propaga a lo largo de una línea y la energía del desplazamiento atómico no es grande.

2.3.3.5 Mecanismo de Vacancia (difusión por huecos).

En toda la red cristalina, sobre todo a temperaturas elevadas, hay vacancias (huecos). Las vacancias brindan la posibilidad de que la difusión se produzca por el intercambio entre un átomo y una vacancia (Fig. 2.5). El paso de los átomos a los sitios vacantes equivale a la traslación de lagunas en dirección contraria a la del movimiento de los átomos. El mecanismo de vacancia se realiza durante la autodifusión y la formación de soluciones sólidas de sustitución.

El mecanismo de difusión por huecos se ve confirmado, de modo conveniente, por el efecto Kirkendall [37]. Este efecto se ha revelado en la mayoría de los pares de los metales con redes cúbicas de caras centradas y de ejes centrados eliminando prácticamente el mecanismo de difusión cíclico y de intercambio, puesto que en este caso la movilidad difusiva de los átomos de los componentes (constante de difusión) es la misma. Para el mecanismo de difusión por huecos tal igualdad no son necesarias frecuencias de intercambio de los átomos de diversas clases con las vacancias pueden ser diferentes.

Muchos procesos termoquímicos (alitación, cromado, silización, etc) están condicionados por la difusión de elementos tales como Al, Cr, Si, etc., que forman con el hierro soluciones sólidas de sustitución. Estos elementos se difunden en el hierro según el mecanismo de vacancias. En la capa de difusión a veces aparece la porosidad, la cual en algunos casos se puede explicar por el efecto Kirkendall.

2.3.3.6 Mecanismo internodal.

En este caso el átomo se desplaza dentro del cristal, saltando de un espacio internodal a otro (fig.2.5) La migración por espacios internodales es posible sólo cuando existe la difusión de pequeñas impurezas de átomos que dan origen a soluciones sólidas intersticiales (dislocadas) y que al saltar desplazan relativamente poco a los átomos del disolvente de sus nudos en la red.

En la industria los más usados son los procesos termoquímicos basados en la difusión de C, N, B en el hierro. Estos elementos, cuyo radio atómico es pequeño, forman con el hierro soluciones sólidas intersticiales. La difusión del C, N y B se desarrolla de acuerdo con el mecanismo internodal. Para llevar a cabo un fenómeno elemental de difusión el átomo ha de vencer una barrera de energía.

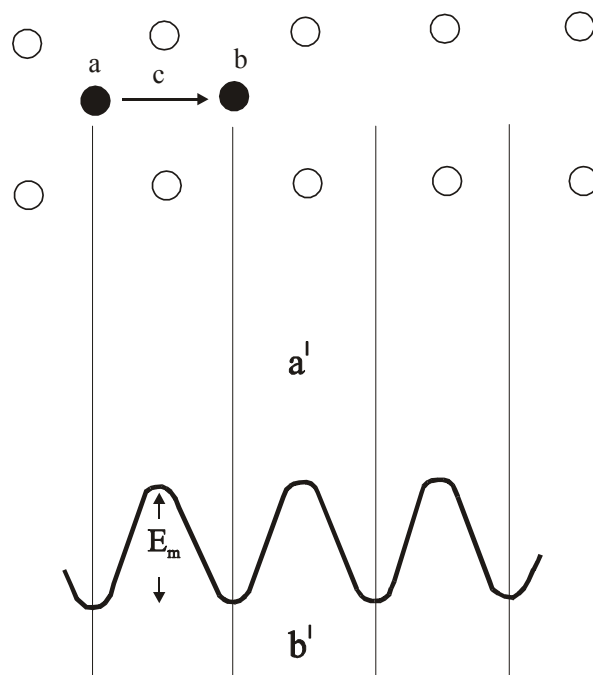


Fig. 2.6 Esquema de un acto elemental de difusión según el mecanismo internodal y energía potencial del cristal en función de la disposición del átomo difundidor.

La fig. 2.6 muestra el esquema de un fenómeno elemental de difusión según el mecanismo internodal y la energía potencial de un cristal en función de la posición del átomo difundidor. La energía del cristal alcanza su valor máximo en el punto C. El aumento de la energía E_{max} , que se manifiesta al desplazar el átomo de un espacio internodal a otro, contiguo, se debe al surgimiento de tensiones elásticas, que se producen al forzar al átomo que migra por el espacio estrecho entre los átomos del disolvente.

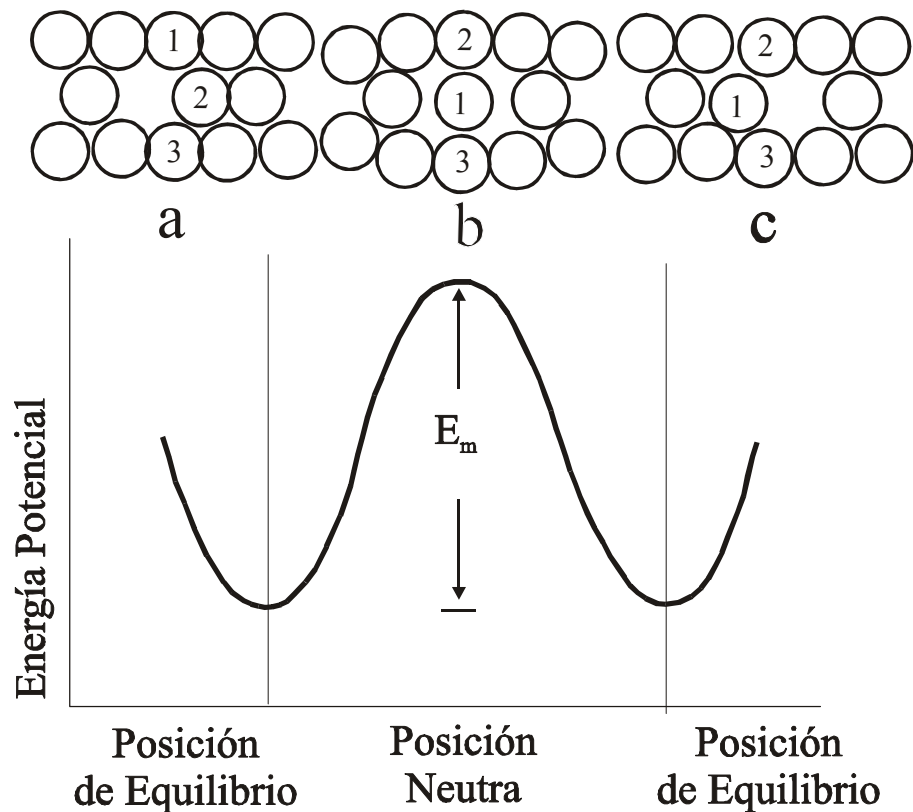


Fig. 2.7 Esquema de un acto elemental de difusión según el mecanismo de vacancias y energía potencial del cristal en función de la disposición del átomo difundidor

En la fig. 2.7 se ve el esquema de desplazamiento del átomo según el mecanismo de vacancias. Al pasar de la posición *a* a la *b* el átomo 1 debe abrirse paso entre los átomos 2 y 3. En la posición intermedia *b'* o neutra, los átomos 2 y 3 están separados entre sí, en este punto la red obtiene una energía elástica considerable. Por esta razón a la posición intermedia *b'* le corresponden un nivel de energía más alto que el de *a* y *b*. El desplazamiento del átomo también está impedido por otros átomos, que se encuentran en los planos atómicos adyacentes por encima y por debajo.

La energía calorífica media de los átomos E_{α} es mucho menor que E_{\max} . La energía necesaria para vencer la barrera de energía E_{\max} , al pasar el átomo de una posición a otra en la red, se suele llamar energía de activación (o calor de difusión) y se designa con la letra Q .

Por consiguiente, para que sea posible la difusión hace falta una fluctuación de la energía. El átomo recibe de sus vecinos energía excesiva debido a que los átomos intercambian continuamente energía cinética. Independiente de los valores medios de la energía cinética de los átomos, en el metal siempre existe cierto número de átomos que poseen energía elevada o reducida. Algunos átomos que poseen una energía de $E_f > Q$, debida a la fluctuación, puede superar la barrera de energía y dar un salto de una posición de equilibrio a otra.

2.3.3.7 Probabilidad de saltos debidos a la fluctuación de energía.

La probabilidad de que el átomo dé saltos de una posición de equilibrio a otra f_m , se determina por la frecuencia con la cual surgen las fluctuaciones que superan Q . El tiempo relativo durante el cual el átomo tiene la energía necesaria para vencer la barrera es proporcional a $\exp(-Q/RT)$.

El átomo, puede con igual probabilidad, pasar a cualquiera de los lugares contiguos equivalentes z en la esfera coordinadora más próxima (z es el número de coordinación). En este caso la frecuencia total de saltos debidos a la fluctuación de energía, calculada por átomo, será igual a

$$f_m = cz\gamma \exp(-Q/RT) \quad (2.1)$$

donde:

f_m = Frecuencia Total de saltos debidos a la fluctuación de energía.

c = Factor de proporcionalidad, próximo a la unidad.

z = Número de coordinación.

γ = Frecuencia de oscilación de los átomos ($\approx 10^{13} \text{ Hz}$).

Q = Energía de activación (calorías/mol)

R = Constante de los gases (1.987 cal/mol.°K)

T = Temperatura (°K).

Así pues, la magnitud f_m depende exponencialmente de la temperatura. Por ejemplo, a temperatura ambiente el átomo de carbono que se difunde en la red de hierro por los intersticios internodales, da un salto en 25s, mientras que a 1545°C, da $2 \cdot 10^{11}$ saltos en 1s. Al elevar la temperatura, las oscilaciones de las partículas en los nodos de la red se intensifican, una parte de las partículas, obtiene una energía que sobrepasa la energía media del movimiento térmico y que es suficiente para que éstas puedan abandonar su lugar en la red y pasar a otro.

Al examinar la difusión según el mecanismo de vacancias se asume que en la red ya había una vacancia. No obstante, en el caso general también se debe gastar una energía igual a Q' en la formación de la vacancia. Entonces, la energía de activación se compone de energía de activación de la migración Q'' y de la energía de formación de vacancias Q' ($Q = Q' + Q''$), en tanto que la probabilidad de los saltos tendrá la forma :

$$f_m = cz\gamma \exp\left(-\frac{Q'}{RT}\right) \exp\left(-\frac{Q''}{RT}\right) \quad (2.2)$$

A causa de esto la energía de activación en la difusión según el mecanismo de vacancias, es superior a la del mecanismo internodal, en cambio la movilidad difusiva de los átomos es menor. En las soluciones sólidas de sustracción el desplazamiento difusivo también transcurre con un gasto de energía menor que en las soluciones sólidas de sustitución, por tener aquellas una cantidad excesiva de vacancias ya formadas.

2.3.3.8 Ecuación de Difusión.

La descripción matemática de la difusión está basada en las suposiciones expresadas por Fick en el año 1855 [8, 9], él escribió las ecuaciones principales de la difusión, considerando la penetración de la sustancia difundidora en la matriz de una manera análoga cuando en un cuerpo hay conducción de calor. La primera ley de Fick, obtenida para la difusión estacionaria, cuando la concentración del elemento difundidor no depende del tiempo, tiene la forma:

$$I = D \left(\partial c / \partial x \right) \quad (2.3)$$

La primera ley demuestra que el flujo de la sustancia difundidora durante la difusión estacionaria es proporcional al gradiente de concentración y está dirigido hacia la disminución de la concentración.

El coeficiente de proporcionalidad D , se denomina constante de difusión y caracteriza la velocidad de difusión. Este depende de la temperatura y de la naturaleza de la sustancia difundidora y de la matriz; está dado por la ecuación:

$$D = D_0 e^{-Q/RT} \quad (2.4)$$

donde:

D_o = Factor de frecuencia y está relacionado con la frecuencia de vibración de los átomos que se difunden (cm^2/seg).

Si la concentración cambia con el tiempo, entonces se emplea la ecuación de difusión, que refleja la variación de la concentración por la unidad de tiempo en un punto determinado de la zona difusiva (segunda ley de Fick):

$$\frac{\partial c(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad (2.5)$$

donde:

D = Coeficiente de Difusión (cm^2/seg).

c = Concentración del elemento que se difunde ($\text{átomos}/\text{cm}^2$).

x = Distancia (cm).

τ = Tiempo (seg).

Suponiendo que la constante de difusión depende en un grado insignificante de la concentración, lo cual se suele hacer en los cálculos prácticos, la ecuación de difusión se puede presentar en la forma:

$$\frac{\partial c(x, \tau)}{\partial \tau} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (2.6)$$

La segunda ley de Fick es una ecuación en derivadas parciales, para la solución unívoca de la cual es indispensable prefijar las condiciones iniciales y de frontera a las que deben satisfacer la concentración del elemento difundidor.

Estas condiciones se determinan por un aspecto concreto de la pieza y del tratamiento termoquímico. La distribución inicial de la concentración del elemento difundidor en la capa, puede ser arbitraria. Por lo general, se supone igual a cero: $c(x, 0) = 0$.

Las condiciones de frontera (medio saturante-matriz) se determinan en función del mecanismo del tratamiento termoquímico a priori.

Las condiciones de frontera de primer género:

$$c(0, \tau) = c^o(\tau) \quad (2.7)$$

significan, desde el punto de vista físico, la concentración del elemento difundidor en la superficie de la pieza $c(0, \tau)$ en un tiempo despreciablemente pequeño, se hace igual a la concentración equilibrada con el medio ambiente, y $c^o(\tau)$ se equilibra con el potencial del ambiente saturante. Con esta condición de frontera el factor cinético se desprecia y se supone que el proceso de tratamiento termoquímico se limita totalmente con la etapa de difusión.

La condición de frontera de primer genero es ampliamente usada en los cálculos prácticos de los procesos de tratamiento termoquímico por la sencillez con que se obtiene la solución de la ecuación de difusión. Si en la superficie se mantiene una concentración constante del elemento difundidor $c(0, \tau) = c^o(\tau) = const$, produciéndose la difusión en un espacio semiinfinito, la solución de la ecuación (2.6) tiene la forma [24, 35]:

$$c(x, \tau) = c^o(\tau) \left[1 - \operatorname{erf} \left(x / 2\sqrt{D\tau} \right) \right] \quad (2.8)$$

donde $c(x, \tau)$ es la concentración del elemento difundidor a la distancia x de la superficie en el momento de tiempo τ ; $c^0(\tau)$, la concentración del elemento difundidor en la superficie durante el proceso de tratamiento termoquímico;

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z \exp(-x^2) dx \quad (2.9)$$

$\operatorname{erf}(z)$, es la función de errores de Gauss que se encuentra en Cuadros.

2.3.4 Etapas de la sinterización.

La sinterización es clave para el proceso de la metalurgia de polvos. Es aquí en donde la pieza adquiere la resistencia para realizar su trabajo mecánico para la cual se ha fabricado. Se distingue tres etapas en la sinterización [3, 4]:

- 1 El primer fenómeno observado en la evolución de un compactado que se está sinterizando es el crecimiento de los puentes de enlace. Las áreas de contacto de las partículas de polvo aumentan, ya que se sueldan íntimamente.
- 2 En la etapa de densificación y crecimiento de grano, que tienen lugar cuando la relación r_n/r fig 2.8 empieza a perder la identidad de compactado, aumentando la densidad y los cambios dimensionales de la pieza.
- 3 En la etapa final aparecen los poros aislados debido a la coalescencia de las partículas. Los poros se redondean y desaparecen los pequeños, en tanto que los mayores crecen. Los cambios dimensionales y de densidad apenas son perceptibles.

Es difícil distinguir entre el crecimiento de los puentes de enlace y la densificación ya que ocurren casi simultáneamente. Por esto algunos autores consideran que se trata de la misma etapa.

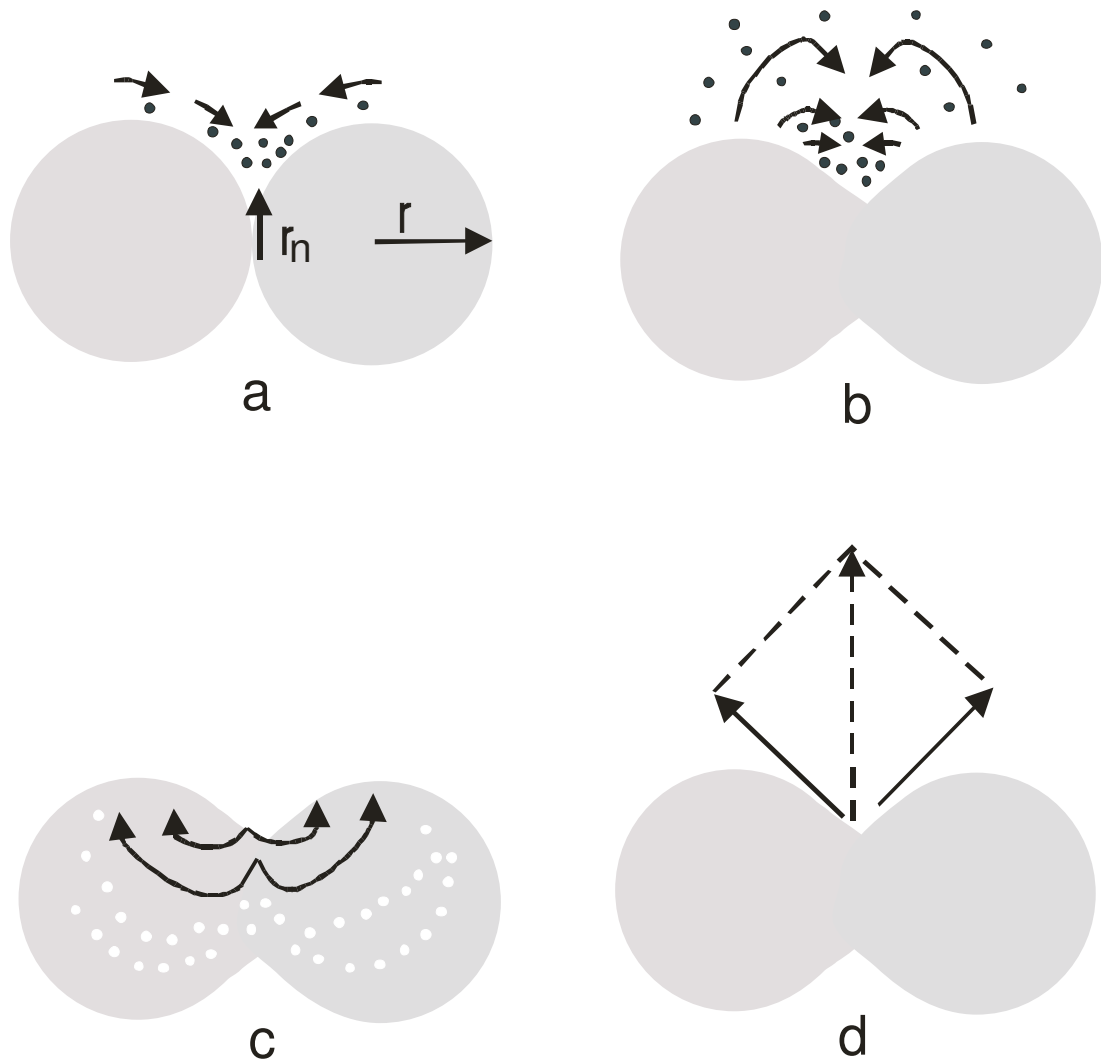


Fig. 2.8 Etapa de los poros interconectados:

- Difusión superficial. Los átomos se mueven a lo largo de la superficie y se reúnen en los puntos de contacto entre partículas aumentando el radio de los puentes de enlace.
- Evaporación-Condensación. En la zona de contacto entre partículas donde hay mayor presión de vapor de metal, crece el radio de los puentes de enlace.
- Difusión a través de la red. Difusión de volumen.
- Fluencia. Deformación a lo largo del puente de enlace como resultado de la tensión superficial.

Fuente: Molera (1977: 73)

2.3.4.1 Mecanismos de Sinterización

Los posibles mecanismos de la sinterización (fig 2.9) se puede esquematizar de la siguiente manera [30]:



Figura 2.9 Mecanismos de la Sinterización.
Fuente: Molera (1977:73-74); Elaboración propia.

El enlace débil ocurre cuando el mecanismo de la adherencia tiene lugar al poner en contacto dos partículas bajo presión, lo que ocurre en la compactación.

El enlace fuerte es cuando la difusión superficial que es un mecanismo de sinterización ocurre en el momento que el compactado alcanza temperaturas del orden de $0,3T_f$. En estas condiciones los átomos superficiales tienen suficiente

movilidad para desplazarse, dirigidos por la tensión superficial, desde la zona convexa a la zona cóncava Fig. 2.10 de dos partículas que están sinterizándose.

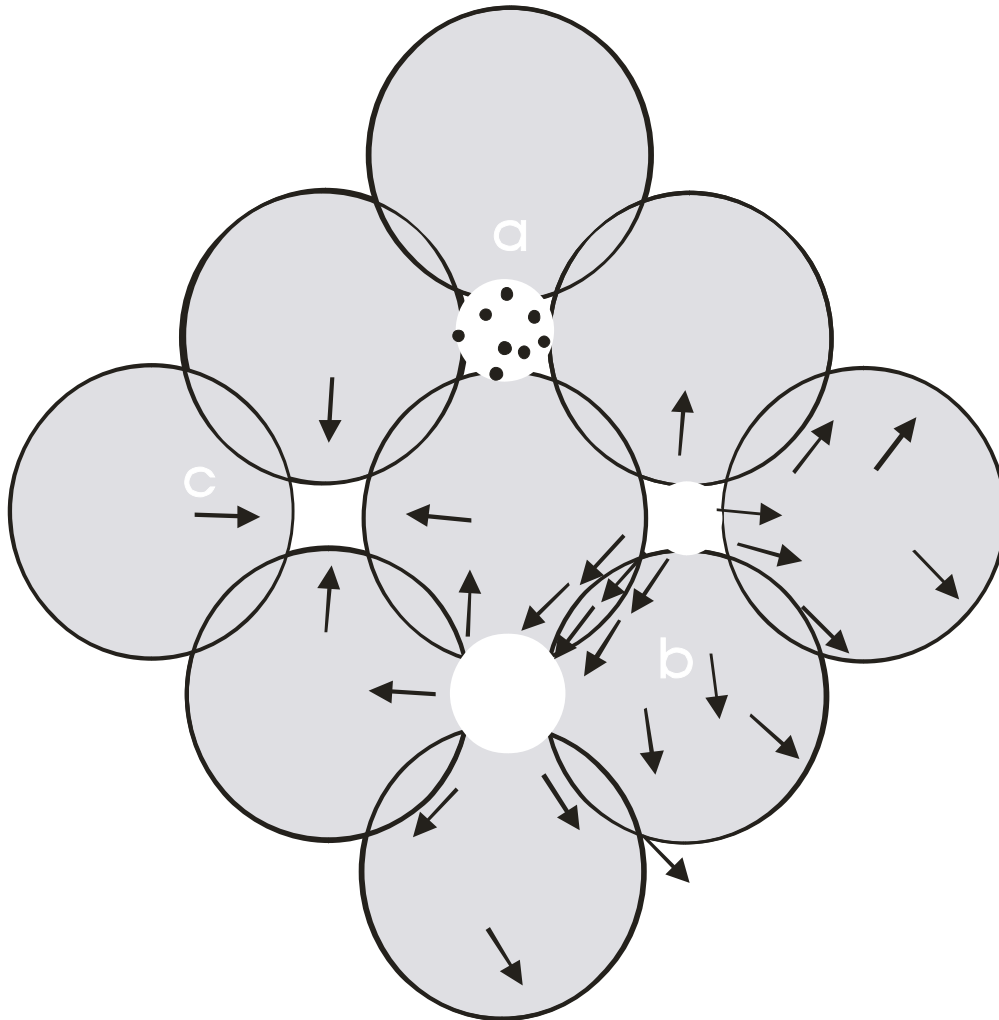


Fig 2.10 Etapa de poros aislados:

1. Difusión superficial y evaporación-condensación. Ocurre simultáneamente. Los polvos se redondean pero no tienen lugar el acercamiento de los centros de las partículas. No hay contracción.
2. Difusión de volumen. Se reduce la porosidad total incrementándose el tamaño medio de los poros.
3. Fluencia. Los poros se reducen por el peso del metal vecino.

Fuente: Molera (1977:74)

El resultado de este mecanismo es un aumento de espesor del puente de enlace sin que ocurra acercamiento de los centros de partículas.

A temperaturas más elevadas que las necesarias para la difusión superficial, se produce, simultáneamente, la evaporación y la condensación del metal. El cambio de fase predominante depende de la presión de vapor, que es mayor encima de una superficie cóncava o menos convexa. Por esta razón se produce una disminución de las superficies convexas y un aumento de las superficies cóncavas. No existe en este mecanismo acercamiento de los centros de las partículas.

Cuando la temperatura en escala absoluta de sinterización es la mitad de la temperatura de fusión de los polvos, el mecanismo que adquiere mayor relevancia es la difusión a través de la red. Esta difusión es posible por las imperfecciones térmicas (vacantes y dislocaciones) existentes en los polvos metálicos o generadas en las etapas de la mezcla, compactación y sinterizado. Las trayectorias de la difusión de vacantes van desde la zona de máxima concentración de defectos a las zonas donde hay menor concentración, es decir, de las fuentes de vacantes a los sumideros de la

Cuadro 2.1

Cuadro 2.1 Dirección y efecto del desplazamiento de vacantes en la difusión de volumen.

FUENTE DE VACANTES	SUMIDERO	EFFECTO DEL DESPLAZAMIENTO
Superficie puente enlace	Superficie partícula	Crece r_n
Superficie puente enlace	Límite de grano	Crece r_n y disminuye d
Superficie puente enlace	Dislocación	Crece r_n
Dislocación	Límite de grano	Crece r_n y disminuye d

Fuente: Molera (1977:76). Elaboración propia.

En la fig 2.11 están representadas las trayectorias de las vacantes en la sinterización de dos partículas esféricas.

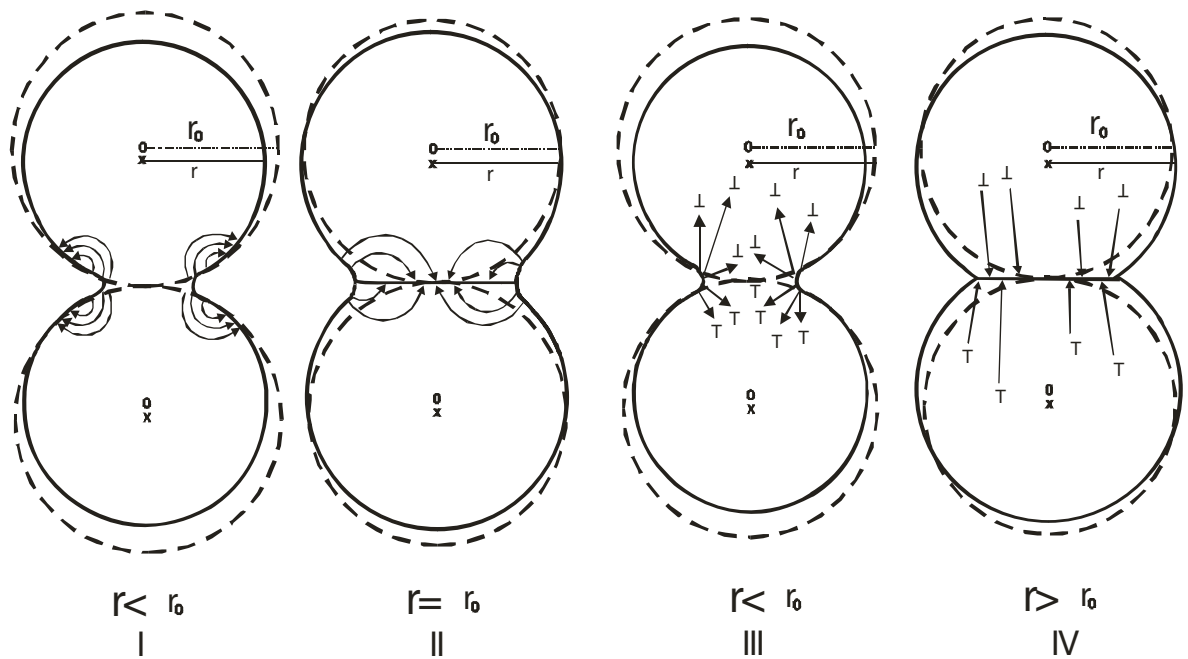


Fig 2.11 Posibles trayectorias de difusión a través de las vacantes de la red en el experimento de modelos esféricos.

Fuente: Hausner (1977:163)

La difusión de vacantes aumenta el espesor del puente de enlace y redondea los poros. Este último efecto se explica por el tránsito de vacantes que existe entre los vértices y los centros de los lados del triángulo curvilíneo representado por tres esferas cuyo esquema aparece en la fig. 2.12.

- ⊖ SUMIDERO VACANTES
- ⊕ FUENTE VACANTES

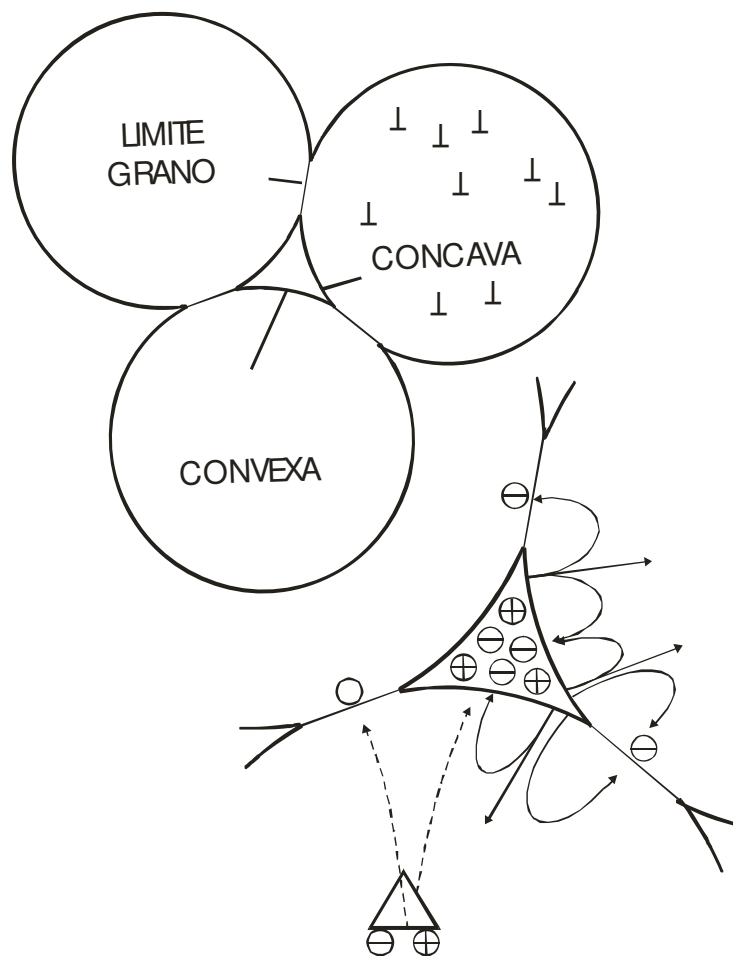


Fig 2.12 Esquema del mecanismo de la difusión de volumen en torno a un poro.
Sección transversal de un conjunto de alambres de cobre de 5 mm de diámetro sinterizados a 1075°C en atmósfera de hidrógeno.
Fuente: Molera (1977:76)

La difusión es más rápida a lo largo de los límites de grano que en el interior de los cristales y más lenta en dichos límites que en las superficies libres, pero el área de límite de grano es, en un metal, inversamente proporcional al tamaño de grano y muy superior al área de superficie. Además los límites de grano forman una red que pasa a través de todo el metal, favoreciendo la homogeneidad cuando la difusión tiene lugar a través de los límites de grano [1].

2.3.4.2 Hornos para Sinterización

La sinterización es clave para el proceso de la metalurgia de polvos. Es aquí en donde la pieza compactada adquiere la resistencia y la fuerza para realizar la función ingenieril para la cual ha sido fabricada. La sinterización se debe realizar casi siempre, a una temperatura debajo del punto de fusión del material que se está tratando [31]. Esta secuencia, se lleva a cabo en un horno de atmósfera controlada (fig. 2.13) con un control en velocidad de calentamiento, del tiempo, de la temperatura (fig. 2.14) y de la atmósfera para obtener resultados que puedan ser reproducidos. En la mayoría de casos se usa el horno eléctrico [27].

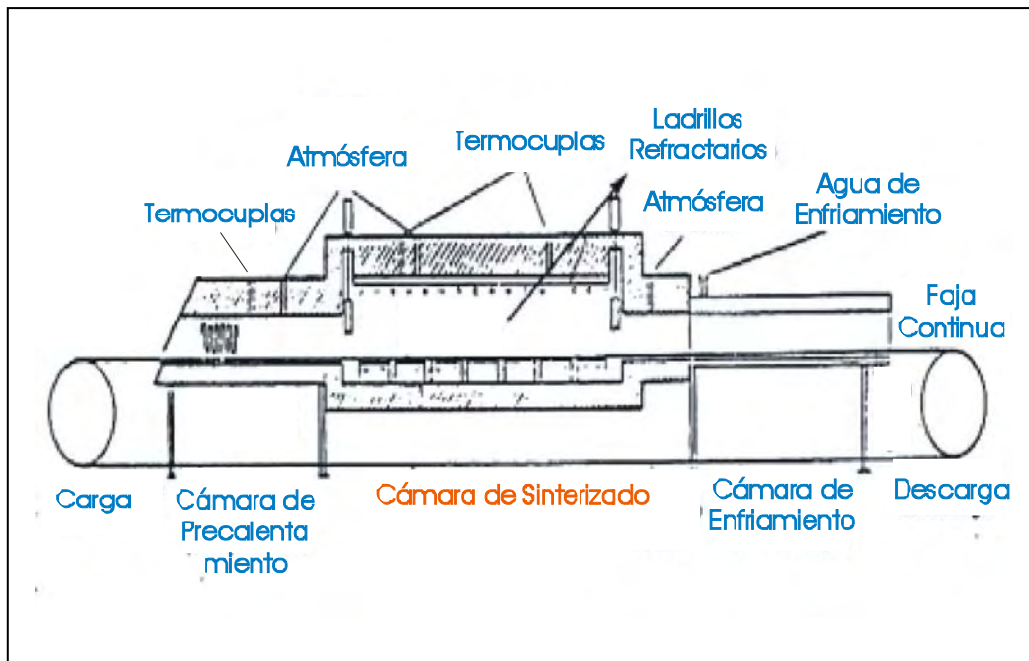


Fig 2.13 Horno de Atmósfera Controlada

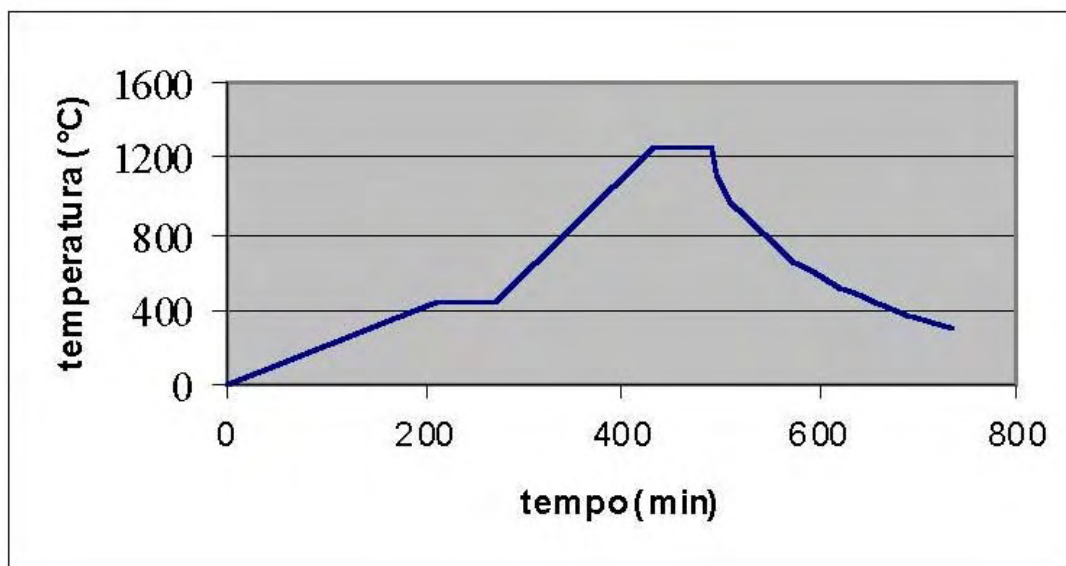


Fig 2.14 Control de la Velocidad de Calentamiento, del Tiempo y la Temperatura del horno de sinterización
Fuente: Mallqui. M. (2006)

El objeto de realizar el proceso en un horno de atmósfera controlada es, permitir la unión de las partículas en estado sólido en un ambiente protegido de la oxidación. La alimentación de las piezas en el horno se realiza mediante una banda fabricada de alambre entrecruzado. Este alambre esta hecho de una aleación Niquel/Cromo (80/20), que permite temperaturas hasta 1150°C. Para temperaturas superiores se pueden usar Carburos de Silicio, que pueden operar hasta 1350°C.

Las atmósferas controladas son una parte esencial en casi cualquier proceso de sinterización ya que previenen la oxidación y otras reacciones que no conviene al proceso. Algunas de las atmósferas más usadas son las compuestas de [27]:

1. **Hidrógeno.** Es una atmósfera altamente reductora, el hidrógeno se almacena en cilindros, es económico , apropiado para instalaciones pequeñas. Existe la posibilidad de explosión. El hidrógeno inerte seco y purificado es una atmósfera apropiada para aleaciones a base de cromo.

2. **Amoniac disociado.** Atmósfera con 75% H_2 + 25% N_2 , se utiliza en el tratamiento de aceros inoxidables, hierro, bronce, cobre y tungsteno.
3. **Amoniac quemado.** Atmósfera formada por (0.5 a 24% H_2 + N_2), obtenida por la quema de amoniac disociado con el aire u oxidación catalítica directa del amoniac con aire y posterior secado. Es la mezcla de N_2 e H_2 más económica para procesar grandes volúmenes de piezas.
4. **Gas exotérmico.** Es una atmósfera que contiene: (14% H_2 +10% CO +5-12% CO_2 + pequeñas cantidades de metano + resto de N_2), este gas es producido por la quema de gas natural con gran liberación de calor por la reacción que se lleva a cabo en quemador refractario. Se emplea en la sinterización del cobre, el bronce, la plata, el hierro y las aleaciones Fe-Cu.
5. **Gas endotérmico.** Constituido por [20]:
 - 39.8 - 45.1 % N_2
 - 19.6 –20.7 % CO
 - 0 – 0.4% CO_2
 - 34.6 –38.7 % H_2

El generador endotérmico no tiene quemador sino que los gases reaccionan entre sí en un catalizador calentado externamente. El gas seco resultante se inyecta al horno de sinterizado.

2.3.5 Calibración.

La calibración se efectúa después del sinterizado, generalmente en matrices diferentes a las que fueron usadas en la compactación, como el propósito es proporcionar las tolerancias dimensionales definitivas o de mejorar las características físicas y mecánicas, como densidad, resistencia mecánica etc., la pieza adquiere un acabado superficial pulido que favorece su acción como material antifricción más allá de mejorar el acabado superficial. La operación es necesaria siempre que las tolerancias dimensionales sean muy estrechas, difíciles de ser controladas durante la

sinterización. Las presiones que se aplican son normalmente inferiores a las de la compresión [25].

2.3.6 Mecanizado.

El mecanizado es una operación que viene siendo cada vez más común en piezas sinterizadas que son producidas algunas veces semi-acabadas, por razones económicas o debido a una gran complejidad de forma, la cual exige un acabado final por mecanizado o rectificado. De modo general, el mecanizado de piezas de hierro o acero sinterizado no ofrecen dificultades cuando su densidad es alta [25].

2.3.7 Impregnación.

La impregnación es una operación en donde se aprovecha la porosidad de las piezas para alojar aceite. Existen tres métodos básicos, que son baño caliente, baño frío el baño parcial de la pieza y el método en vacío.

El método del baño caliente y frío es el más común. Por este método la pieza es sometida a varios baños consecutivos a diferentes temperaturas. Este método tiene la intención de remover las inclusiones de aire por la variación de la viscosidad del aceite y de la expansión (contracción) de los poros en la pieza sinterizada.

En el método de inmersión parcial el aceite ingresa por acción capilar. El método es efectivos, pero lento. En la parte superior de la pieza el aire sale en la medida en que el aceite sube, pero en la parte sumergida puede suceder que las burbujas de aire queden completamente tapadas por el aceite.

En el método de vacío las piezas son colocadas en una cámara de vacío para retirarles todo el aire y luego se abre una válvula que permite el ingreso del aceite

hasta que las piezas queden sumergidas. Posee una desventaja en relación a los baños calientes y fríos, pues los componentes de baja viscosidad del aceite se vaporizan dejándolo más viscoso.

En la impregnación con aceite, la porosidad interligada es de importancia relevante. Solamente con todos los poros abiertos comunicados con la superficie tendremos una impregnación completa [21].

2.4 Características Típicas de los Cojinetes Autolubricados.

Los cojinetes autolubricados son muy utilizados en diversos sectores industriales por sus características tales como: buena resistencia a altas temperaturas y a productos químicos. Recomendados para ambientes agresivos con agua salina a bajas y altas temperaturas (Cuadro 2.2) [33].

Cuadro 2.2

Propiedades de los Cojinetes							
Norma	Material	Composición Química %	Densidad gr/cm³	Porosidad %	Constante Radial de Carga kg/mm²	Resistencia a la Tracción kg/mm²	Dureza Aparente Rockwell
SAE 840	Bronce de Baja Densidad	Cu = 90 Sn = 10	5.8 - 6.2	25 mínimo	10.5	6.0	---
SAE 841	Bronce de densidad media	Cu = 90 Sn = 10	6.4 - 6.8	18 mínimo	17.5	10.0	60 Rh
SAE 842	Bronce de alta densidad	Cu = 90 Sn = 10	6.8 - 7.2	10 mínimo	21.35	14.0	75 Rh
SAE 843	Bronce Cupro- Plomo	Cu = 90 Sn = 4 Pb = 7.4	7.0 - 7.4	7 mínimo	8.5	7.0	65 Rh
SAE 850	Hierro	Fe = 97.5 mínimo.	5.8 - 6.2	18 mínimo	19.0	13.5	50 Rh
SAE 862	Acero al Cobre	Fe = 91 C = 0.6 Cu = 8.4	5.8 - 6.2	18 mínimo	28.0	35.0	55 Rh
Fuente: Stadler (2006); Hausner (1977: 313:317). Elaboración propia.							

2.5 Cambio Dimensional.

Existen dos tipos de cambios dimensionales [30]: el positivo y el negativo. El primero es el que sufre la pieza sinterizada que tiene unas dimensiones superiores a la matriz de calibrado y en la operación de calibrado se reducirá el diámetro. El segundo tipo es aquel en que la pieza tubular sinterizada entra con holgura en la matriz de calibrado y se ajustan las medidas introduciendo un punzón de diámetro algo superior al diámetro interior de la pieza tubular.

CAPITULO III

METODOLOGÍA

3.1 Introducción

El sinterizado es una técnica para la obtención de piezas de precisión en grandes series para la industria automotriz y electrodoméstica, sin pérdida de material y por procesos que lo hacen altamente fiable y económico.

Prácticamente todas las operaciones clásicas de acabado metalúrgico son posibles en las piezas sinterizadas: Mecanizados auxiliares, tratamientos térmicos, recubrimientos superficiales, etc.

Las propiedades de éstas piezas son influenciadas por diversos factores y parámetros tales como la temperatura, el tiempo el porcentaje de cobre, el porcentaje de zinc, la densidad y la porosidad, es así que para la realización de este trabajo de investigación fue necesario preparar cojinetes autolubricados a fin de evaluar las transformaciones ocurridas después del proceso de sinterizado.

La selección de los metales para esta investigación ha sido en función a nuestros recursos minerales, sabemos que nuestro país es un gran productor de cobre y zinc y la idea era darle un valor agregado a nuestros concentrados.

En la Cuadro 3.1 se muestra la composición química escogida:

Cuadro 3.1

Composición Química de la Nueva Aleación $92\text{Cu}8\text{Zn}1\text{Zn}(\text{C}_{10}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$		
Cobre	=	92%
Zinc	=	8%
Estearato de Zinc	=	1%
Fuente: Elaboración propia		

En el desarrollo de esta investigación se determinó que sí era posible la unión de polvos metálicos de cobre y zinc, en condiciones adecuadas para lograr las características y propiedades que requieren los cojinetes autolubricados.

3.2 Obtención y preparación de probetas de la nueva aleación $92\text{Cu}8\text{Zn}1\text{Zn}(\text{C}_{10}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$.

3.2.1 Número de muestras

De acuerdo al número de ensayos, análisis y réplicas se decidió preparar 180 probetas, las cuales se distribuyeron de la siguiente manera:

- 36 Probetas para el ensayo de rotura.
- 36 Probetas para el cambio dimensional en el diámetro exterior, en el diámetro interior y en la longitud.
- 36 Probetas para determinar la densidad, porosidad y contenido de aceite.
- 36 Probetas para el análisis químico.
- 36 Probetas para el análisis metalográfico.

Para poder identificar las probetas se le asignó un código detallado en las Cuadros 3.2 a la 3.6.

Cuadro 3.2

Código-Carga radial (kg)			
Tiempo min Temperatura°C	10	15	20
880	C88101	C88151	C88201
	C88102	C88152	C88202
	C88103	C88153	C88203
	C88104	C88154	C88204
900	C90101	C90151	C90201
	C90102	C90152	C90202
	C90103	C90153	C90203
	C90104	C90154	C90204
910	C91101	C91151	C91201
	C91102	C91152	C91202
	C91103	C91153	C91203
	C91104	C91154	C91204
Fuente: Elaboración propia			

Cuadro 3.3

Código- Cambio dimensional en el Ø exterior, ØInterior y en la longitud (%)			
Tiempo min Temperatura°C	10	15	20
880	EIL88101	EIL88151	EIL88201
	EIL88102	EIL88152	EIL88202
	EIL88103	EIL88153	EIL88203
	EIL88104	EIL88154	EIL88204
900	EIL90101	EIL90151	EIL90201
	EIL90102	EIL90152	EIL90202
	EIL90103	EIL90153	EIL90203
	EIL90104	EIL90154	EIL90204
910	EIL91101	EIL91151	EIL91201
	EIL91102	EIL91152	EIL91202
	EIL91103	EIL91153	EIL91203
	EIL91104	EIL91154	EIL91204
Fuente: Elaboración propia			

Cuadro 3.4

Código- Densidad (gr/cm³), Porosidad (%)y el Contenido de Aceite (cm³)			
Tiempo min Temperatura°C	10	15	20
880	DPA88101	DPA88101	DPA88101
	DPA88102	DPA88102	DPA88102
	DPA88103	DPA88103	DPA88103
	DPA88104	DPA88104	DPA88104
900	DPA90101	DPA90101	DPA90101
	DPA90102	DPA90102	DPA90102
	DPA90103	DPA90103	DPA90103
	DPA90104	DPA90104	DPA90104
910	DPA91101	DPA91101	DPA91101
	DPA91102	DPA91102	DPA91102
	DPA91103	DPA91103	DPA91103
	DPA91104	DPA91104	DPA91104
Fuente: Elaboración propia			

Cuadro 3.5

Código - Análisis químico de Cobre y Zinc(%)			
<div>Tiempo min Temperatura°C</div>	10	15	20
880	CZ88101	CZ88151	CZ88201
	CZ88102	CZ88152	CZ88202
	CZ88103	CZ88153	CZ88203
	CZ88104	CZ88154	CZ88204
900	CZ90101	CZ90151	CZ90201
	CZ90102	CZ90152	CZ90202
	CZ90103	CZ90153	CZ90203
	CZ90104	CZ90154	CZ90204
910	CZ91101	CZ91151	CZ91201
	CZ91102	CZ91152	CZ91202
	CZ91103	CZ91153	CZ91203
	CZ91104	CZ91154	CZ91204
Fuente: Elaboración propia			

Cuadro 3.6

Código-Metalografía			
<div>Tiempo min Temperatura°C</div>	10	15	20
880	M88101	M88151	M88201
	M88102	M88152	M88202
	M88103	M88153	M88203
	M88104	M88154	M88204
900	M90101	M90151	M90201
	M90102	M90152	M90202
	M90103	M90153	M90203
	M90104	M90154	M90204
910	M91101	M91151	M91201
	M91102	M91152	M91202
	M91103	M91153	M91203
	M91104	M91154	M91204
Fuente: Elaboración propia			

3.2.2 Polvos Metálicos

Se ha utilizado una mezcla de polvos metálicos con la composición química en peso que se muestra en la Cuadro 3.7, el estearato de zinc es un aditivo para facilitar el deslizamiento de la mezcla metálica dentro de la matriz en la etapa de la compactación de las probetas.

Cuadro 3.7

Mezcla metálica de Cobre y Zinc y Estearato de zinc		
% Cu	% Zn	% $\text{Zn}(\text{C}_{10}\text{H}_{15}\text{O}_2)_2$ Estearato de Zinc (aditivo)
92	8	1
Fuente: Elaboración propia		

3.2.3 Forma de las probetas

La elección de la forma de las probetas ha sido en función a la viabilidad de poder determinar las propiedades de la nueva aleación $92\text{Cu}8\text{Zn}1\text{Zn}(\text{C}_{10}\text{H}_{15}\text{O}_2)_2$, después de un análisis detallado de los diferentes tipos de cojinetes (Fig. 3.1) , se tomó la decisión de que la forma sería cilíndrica como se muestra en la Fig. 3.2



Fig. 3.1 Piezas sinterizadas autolubricadas
Fuente: Ibinsa. 2006. Elaboración propia

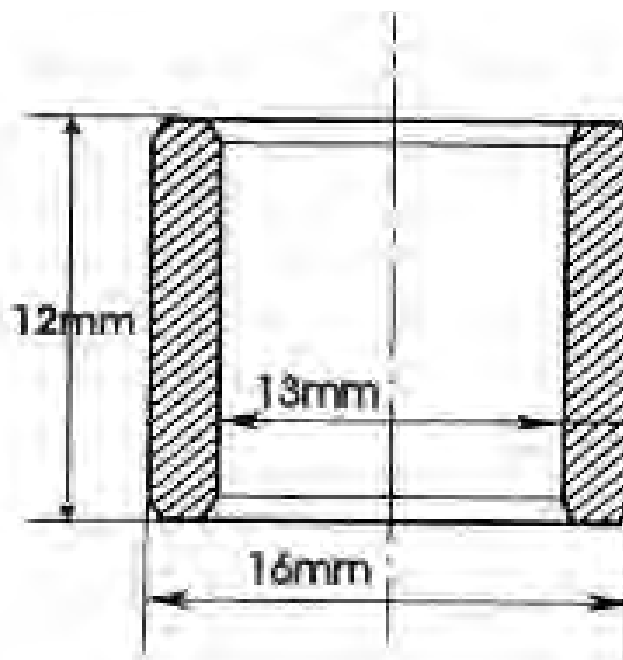


Fig. 3.2 Cojinete cilíndrico
Fuente: Hausner. 1973. Elaboración propia

3.2.4 El Mezclado

El mezclado se realizó en un mezclador de polvos (Fig. 3.3)

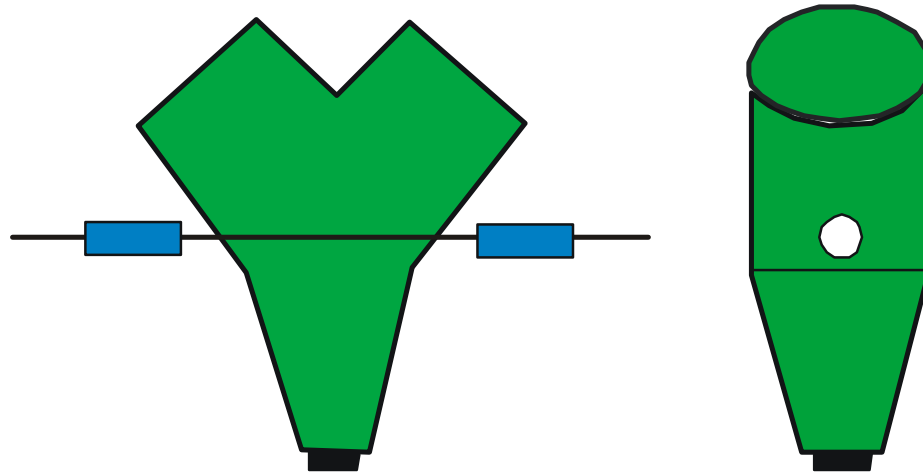


Fig. 3.3 Mezclador de polvos
Fuente: Hausner. 1973. Elaboración propia

3.2.5 La Compactación

La compactación se realizó en 3 etapas: El llenado, el prensado y la extracción.

3.2.5.1 El Llenado: Es una operación en la cual se llena la matriz de compactado con la mezcla de polvos, este llenado es automático.

3.2.5.2 El prensado: Una vez llenada la cavidad de la matriz se procede al prensado para darle la forma de cojinete.

3.2.5.3 La Extracción: Después de la operación de prensado el cojinete es necesario extraerlo y para eso se emplea un punzón extractor de acero con tratamiento térmico.

3.2.6 El Sinterizado.

El sinterizado se realizó a 880°C, 900°C, y 910°C durante 10min, 15min y 20min respectivamente condiciones que, nos van a permitir evaluar variación de las propiedades adquiridas por los cojinetes.

3.2.7 La Calibración.

Después del sinterizado los cojinetes sufren una deformación la cual implica estar fuera del rango de medidas y el calibrado es la operación que corrige esta variación dimensional.

3.3 ANÁLISIS, ENSAYOS Y DATOS

3.3.1 Análisis granulométrico

El objetivo de este análisis es la determinación de la distribución de tamaño de partículas de las muestras de polvo metálico según la Norma ASTM B 214 - 76, basado en la separación en fracciones de partículas mediante tamices TYLER normalizados por mallas y dimensiones de partículas, colocados en orden consecutivo según el tamaño de abertura de la malla.

Este método es aplicable a polvos metálicos secos que no contengan lubricantes en su composición. Está limitado cuando en la muestra hay partículas menores de 45 micras. (Cuadro 3.8 y 3.9).

Cuadro 3.8					
Análisis granulométrico del polvo de cobre					
Malla estándar					%
	+	80	(177 μ)	.....	0
- 80	+	100	(149 μ)	.....	0
- 100	+	140	(105 μ)	.....	1
- 140	+	200	(074 μ)	.....	10
- 200	+	325	(044 μ)	.....	24
- 325					65
Fuente: Norma ASTM. Elaboración propia					

Cuadro 3.9					
Análisis granulométrico del polvo de zinc					
Malla estandar					%
	+	80	(177 μ)	.....	0
- 80	+	100	(149 μ)	.....	0
- 100	+	140	(105 μ)	.....	0
- 140	+	200	(074 μ)	.....	18
- 200	+	325	(044 μ)	.....	80
- 325					2
Fuente: Norma ASTM, Elaboración propia					

3.3.2 Análisis Químico

En la Cuadro 3.10 y 3.11 se muestran el resultado de la composición química de los cojinetes realizados en un espectrofotómetro.

Cuadro 3.10			
Análisis químico - % de Cobre en el Cojinete			
<div> <div>Tiempo (min)</div> <div>Temperatura°C</div> </div>	10	15	20
880	91.99	91.99	92.00
	91.95	91.99	92.00
	91.95	91.99	91.90
	92.00	91.98	91.80
900	91.90	91.97	92.00
	92.00	91.98	91.40
	91.60	91.60	91.80
	91.50	91.90	91.00
910	91.90	91.98	91.60
	91.99	91.97	91.60
	91.98	91.96	91.30
	91.59	91.95	91.80
Fuente: Elaboración propia			

Cuadro 3.11

Análisis químico - % de Zinc en el Cojinete			
<div> <div>Tiempo(min)</div> <div>Temperatura°C</div> </div>	10	15	20
880	5.94	6.81	7.46
	6.41	7.23	7.24
	6.36	7.60	7.65
	7.08	7.01	7.79
900	7.66	7.08	7.43
	7.03	7.42	8.00
	8.00	5.83	7.80
	8.00	6.11	8.00
910	7.58	6.08	8.00
	6.98	6.82	7.98
	7.06	7.01	8.00
	6.89	6.69	7.72
Fuente: Elaboración propia			

3.3.3 Ensayo de Carga radial

El objetivo es obtener valores (Cuadro 3.12) de la carga con la cual se rompe el cojinete calibrado, datos que nos servirán para calcular el factor de resistencia a la rotura radial. Este método se aplica a las piezas cilíndricas sinterizadas y calibradas.

Cuadro 3.12

Resultados del ensayo de la Carga radial (kg)			
<div> <div>Tiempo (min)</div> <div>Temperatura^{°C}</div> </div>	10	15	20
880	28.80	43.20	39.60
	28.80	43.20	39.60
	28.80	43.20	43.20
	28.80	46.80	39.60
900	39.60	50.40	46.80
	28.80	43.20	46.80
	32.40	43.20	50.40
	36.00	39.60	50.40
910	46.80	50.40	46.80
	46.80	46.80	46.80
	46.80	46.80	48.60
	46.80	46.80	46.80
Fuente: Elaboración propia			

El ensayo consiste en comprimir el cojinete entre dos placas planas paralelas a su eje hasta su rotura (Norma Técnica de AMES S.A).

3.3.4 Factor de resistencia a la rotura radial.

El factor de resistencia a la rotura radial se determina aplicando la norma del cojinete autolubricado [3, 4, 20] expresada por la ecuación 3.1 y los resultados se muestran en la Cuadro 3.13.

$$P = K \frac{L \times T^2}{D - T} \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

P = Resistencia radial a la rotura en kg/mm².
K = Factor de resistencia a la rotura radial en kg/mm².
L = Longitud del Cojinete en mm.
T = Espesor de la pared del Cojinete o cilindro mec. en mm.
D = Diámetro exterior del Cojinete en mm.

Cuadro 3.13

Resultados del Factor de resistencia a la rotura radial			
Temperatura°C \ Tiempo (min)	10	15	20
880	8	11	10
	8	11	10
	8	11	11
	8	12	10
900	10	13	12
	8	11	12
	8	11	13
	9	10	13
910	12	13	12
	12	12	12
	12	12	13
	12	12	12
Elaboración propia.			

3.3.5 Ensayo de Cambio dimensional

Este método se realiza en el diámetro exterior, interior y en la longitud del cojinete sinterizado y calibrado a fin de evaluar el cambio dimensional con respecto al cojinete compactado, basado en la Norma ASTM B 610-82. Fig. 3.14 a 3.16.

Cuadro 3.14

Resultados del Cambio dimensional en el diámetro exterior (%)			
Temperatura°C	Tiempo(min)		
	10	15	20
880	-0.61	-1.35	-0.89
	-0.67	-1.22	-1.31
	-0.98	-0.98	-0.92
	-0.74	-1.25	-0.98
900	-0.31	-0.67	-1.34
	-0.43	-0.86	-1.53
	-0.61	-2.54	-1.53
	-1.07	-0.73	-2.79
910	-1.01	-0.92	-2.17
	-0.70	-1.87	-1.71
	-0.86	-0.95	-1.56
	-1.23	-1.84	-2.39

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 3.15

Resultados del Cambio dimensional en el diámetro interior (%)			
Temperatura°C	Tiempo (min)		
	10	15	20
880	0.12	-1.36	-1.96
	-0.62	-0.90	-1.76
	-1.15	-2.18	-2.66
	-0.53	-2.58	-3.52
900	-2.05	-0.91	-2.17
	-2.33	-1.93	-3.08
	-0.99	-2.06	-1.97
	-0.08	-1.77	-1.03
910	-0.04	-1.73	-2.18
	-1.07	-0.82	-1.88
	-2.05	-2.26	-1.68
	-1.57	-1.84	-1.52

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 3.16

Resultados del Cambio dimensional en la longitud (%)			
Tiempo (min)	10	15	20
Temperatura°C			
880	2.29	1.48	1.34
	1.95	1.77	1.16
	1.96	1.88	1.45
	1.70	1.74	1.12
900	1.91	2.06	1.30
	2.21	1.41	0.90
	1.99	1.63	1.23
	1.91	2.03	1.01
910	1.77	1.70	1.52
	1.66	1.34	1.30
	2.14	0.58	1.70
	1.88	1.70	1.30
Fuente: Elaboración propia			

3.3.6 Microscopía Óptica.

Actualmente el microscopio óptico es familiar a la mayoría de los investigadores dedicados a las ciencias físicas, puesto que se ha convertido en una herramienta fundamental dentro de la investigación, principalmente en la microestructura de los materiales.

Fue conveniente incorporar esta técnica en este trabajo ya que nos permitiría la visualización de los polvos metálicos sinterizados.

Siguiendo la técnica de la microscopía óptica, las muestras se pulieron con pasta de diamante, se lavaron con agua, secadas y finalmente se observaron y analizaron a 100x, 500x y 1000x.

En las Fig. 3.4 a la 3.6 se presentan las micrografías de las muestras que han sido sinterizadas a 800°C por 10 minutos

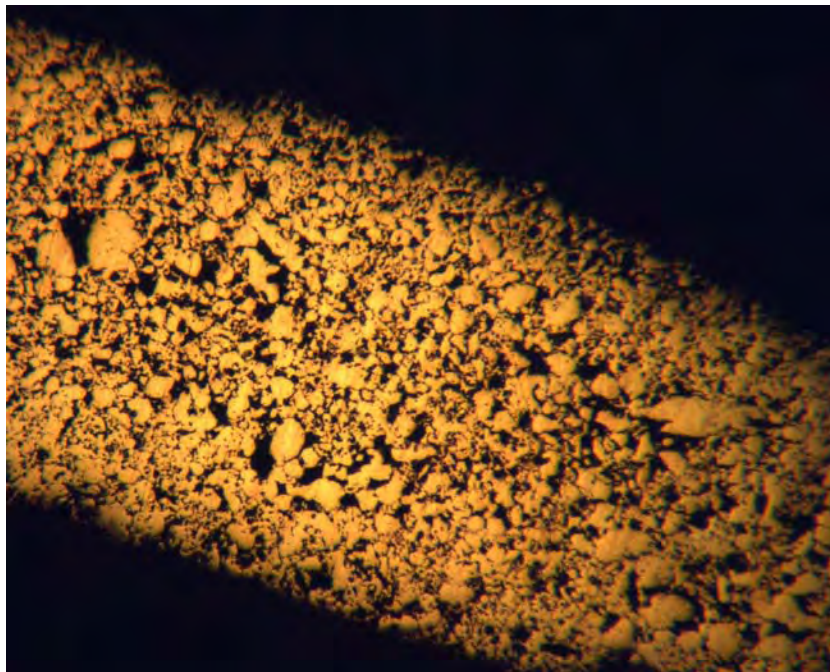


Fig. 3.4 Micrografía del Sinterizado 880°C x 10 minutos. Sin ataque. **100x**.
Fuente: Elaboración propia

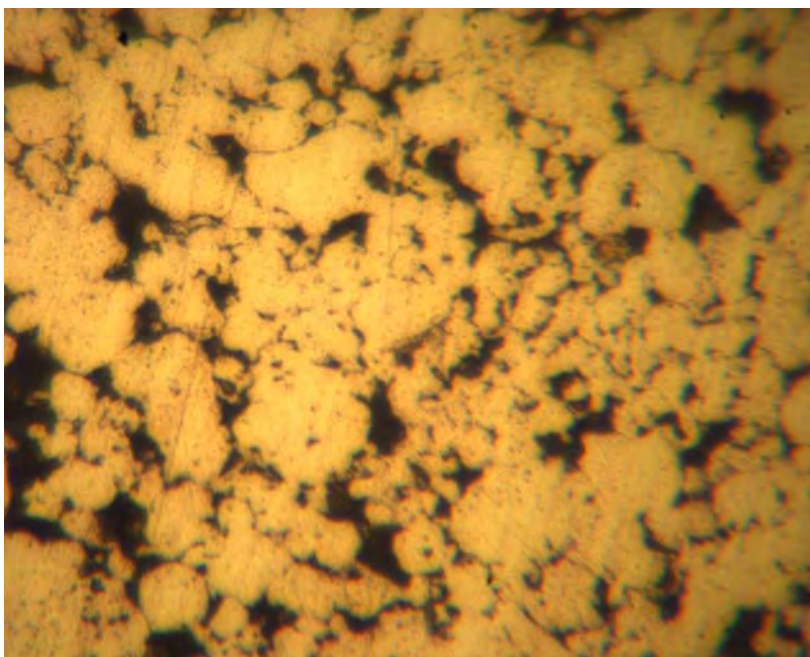


Fig. 3.5 Micrografía del Sinterizado 880°C x 10 minutos. Sin ataque. **500x**.
Fuente: Elaboración propia

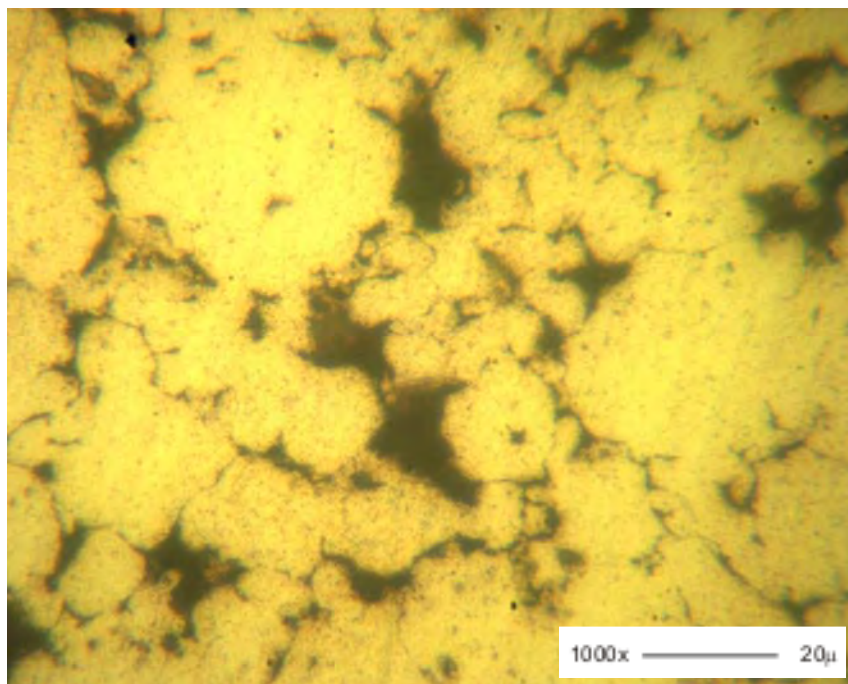


Fig. 3.6 Micrografía del Sinterizado 880°C x 10 min. Sin ataque. **1000x**.
Fuente: Elaboración propia

En las fig.3.7 a la 3.9 se observan las muestras sinterizadas a 880°C durante 15 minutos

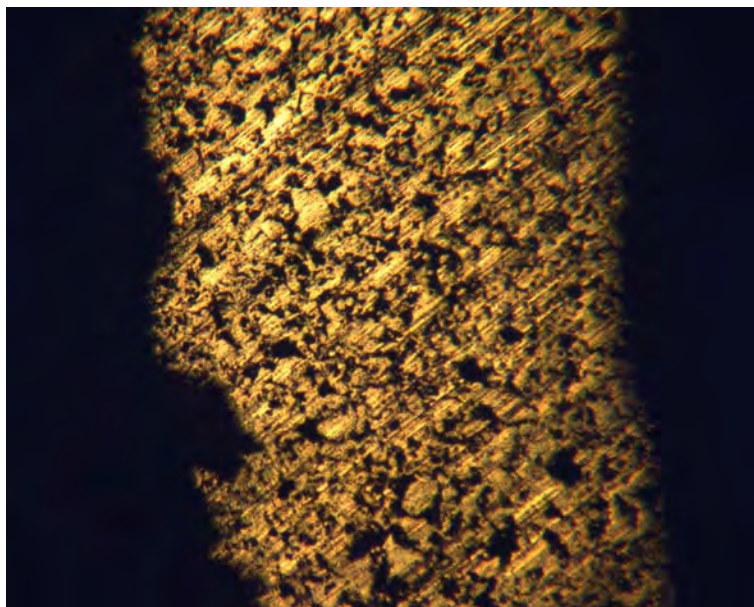


Fig. 3.7 Micrografía del Sinterizado 880°C x 15 minutos. Sin ataque. **100x**.
Fuente: Elaboración propia.

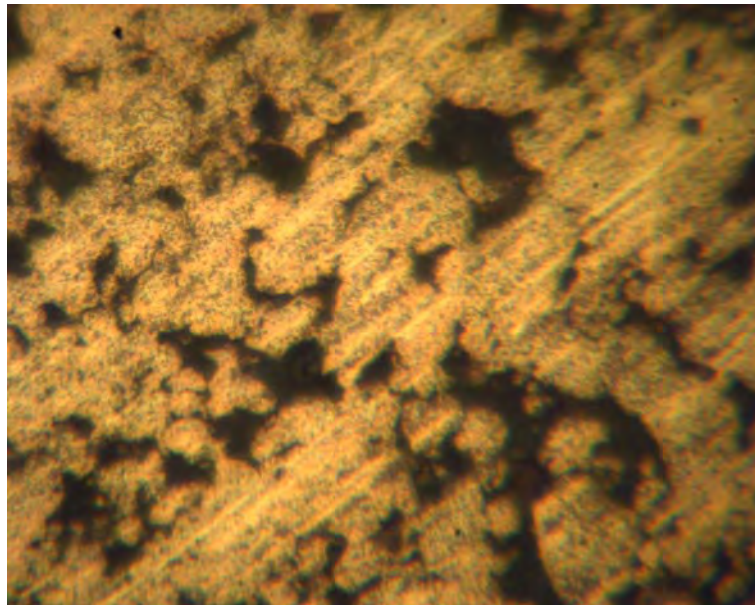


Fig. 3.8 Micrografía del Sinterizado 880°C x 15 minutos. Sin ataque. **500x**.
Fuente: Elaboración propia

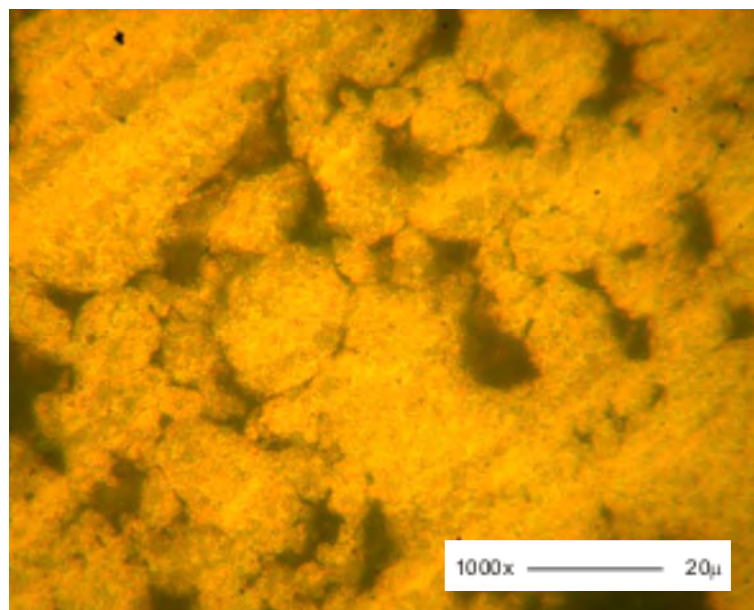


Fig. 3.9 Micrografía del Sinterizado 880°C x 15 minutos. Sin ataque. **1000x**.
Fuente: Elaboración propia

En la Fig. 3.10 a la 3.12 .se observan las muestras sinterizadas a 880°C durante 20 minutos

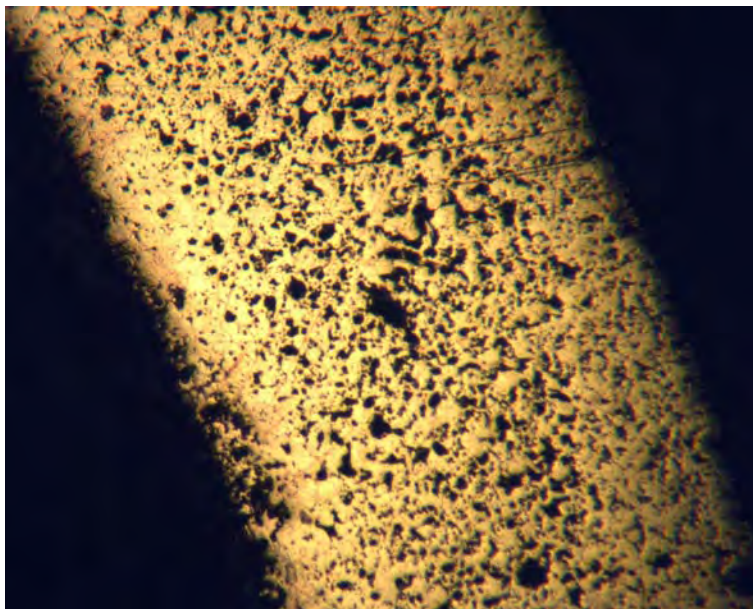


Fig. 3.10 Micrografía del Sinterizado 880°C x 20 minutos. Sin ataque. **100x**.
Fuente: Elaboración propia

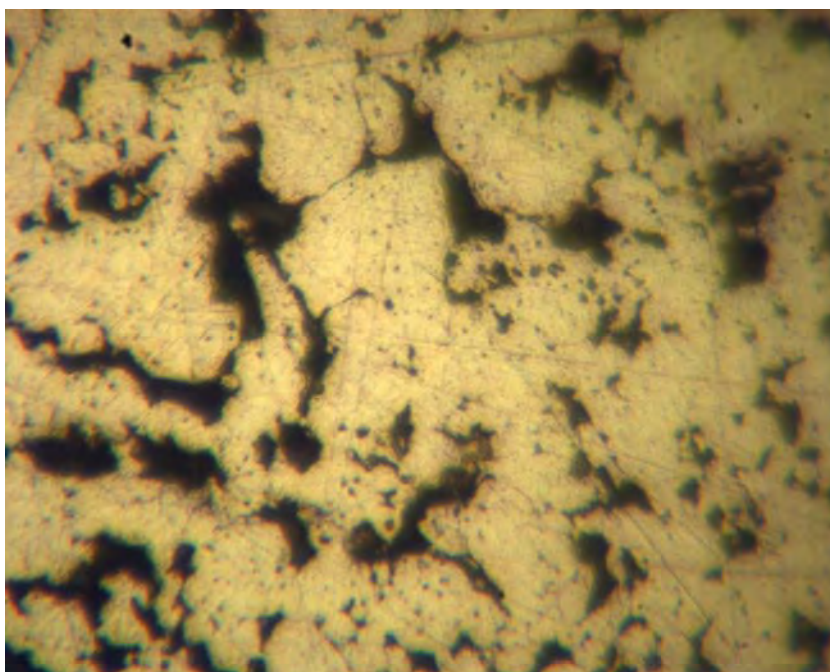


Fig. 3.11 Micrografía del Sinterizado 880°C x 20 minutos. Sin ataque. **500x**.
Fuente: Elaboración propia

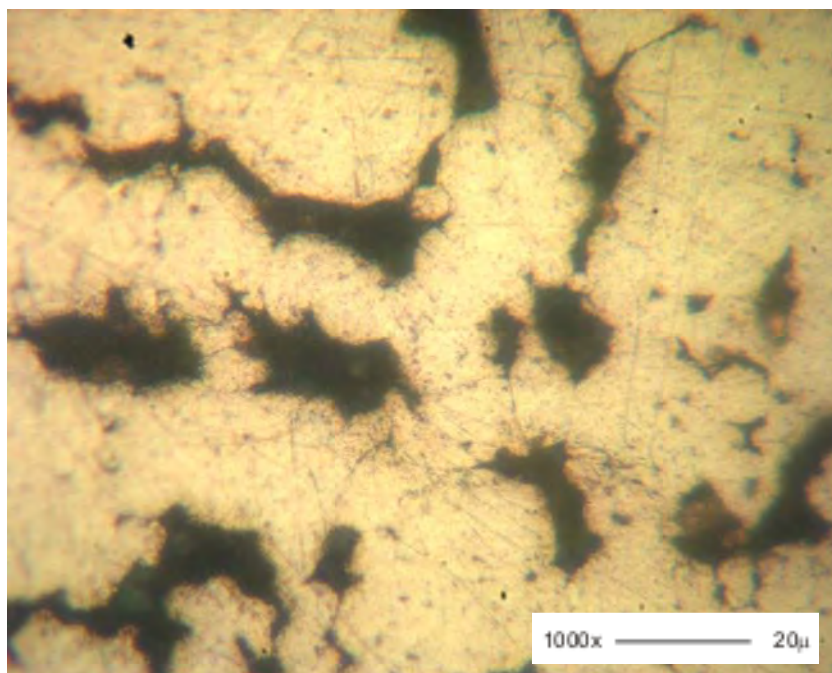


Fig. 3.12 Micrografía del Sinterizado 880°C x 20 minutos. Sin ataque. **1000x**.
Fuente: Elaboración propia

En las Fig. 3.13 a la 3.15 se presentan las muestras obtenidas después del sinterizado a 900°C durante 10 minutos.

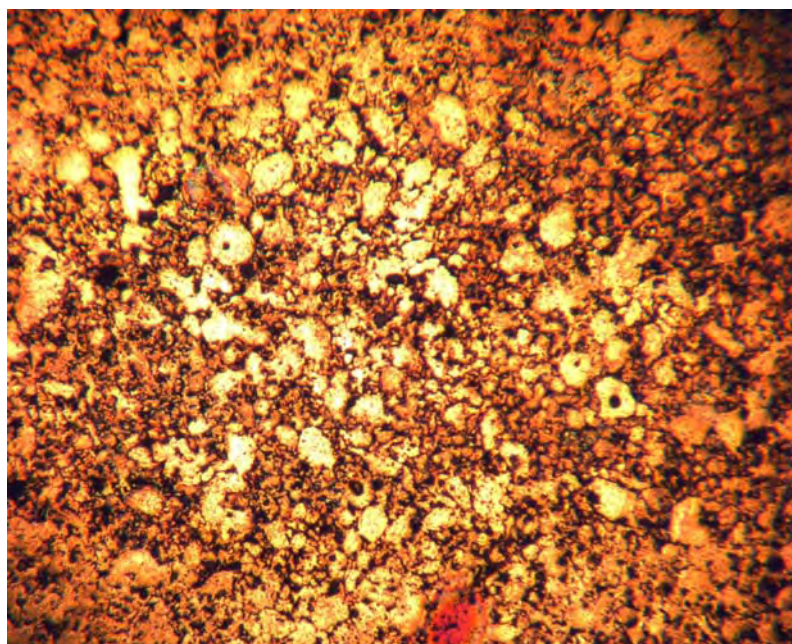


Fig. 3.13 Micrografía del Sinterizado 900°C x 10 minutos. Sin ataque. **100x**.
Fuente: Elaboración propia.

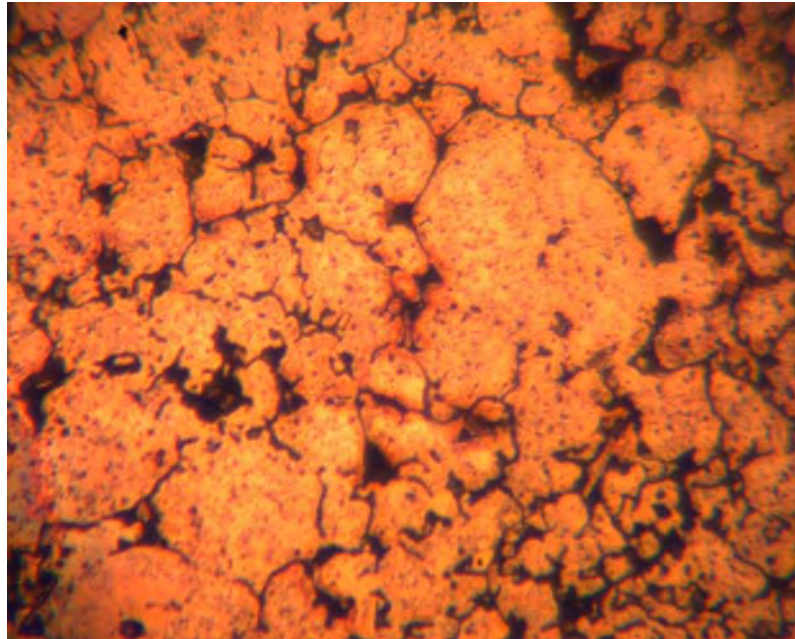


Fig. 3.14 Micrografía del Sinterizado 900°C x 10 minutos. Sin ataque. **500x**.
Fuente: Elaboración propia.

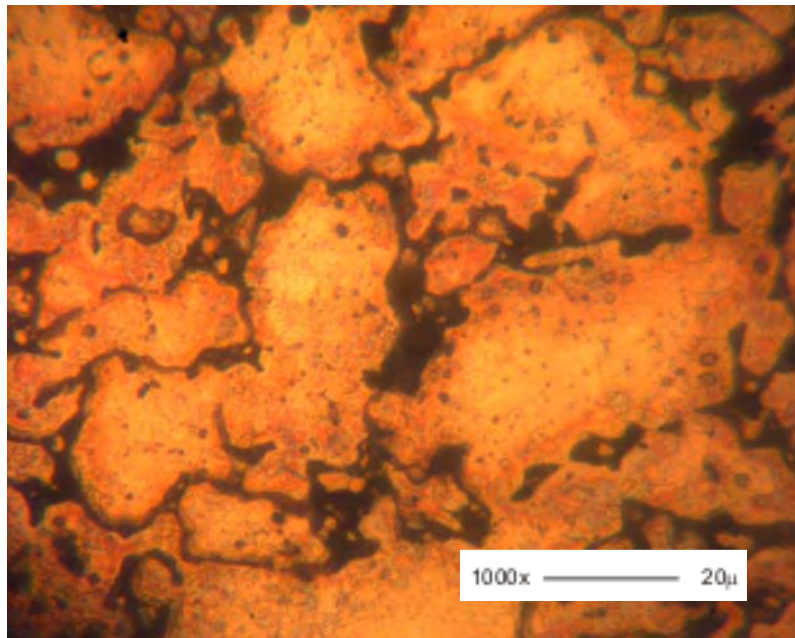


Fig. 3.15 Micrografía del Sinterizado 900°C x 10 minutos. Sin ataque. **1000x**.
Fuente: Elaboración propia.

Las Fig. 3.16 a la 3.18 se presentan las muestras obtenidas después del sinterizado a 910°C durante 10 minutos.

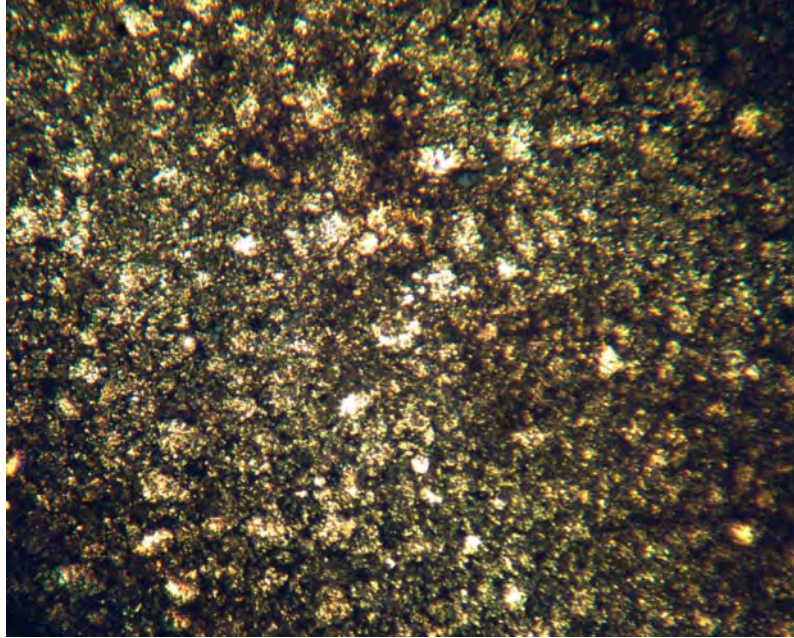


Fig. 3.16 Micrografía del Sinterizado 900°C x 15 minutos. Sin ataque. **100x**.
Fuente: Elaboración propia.

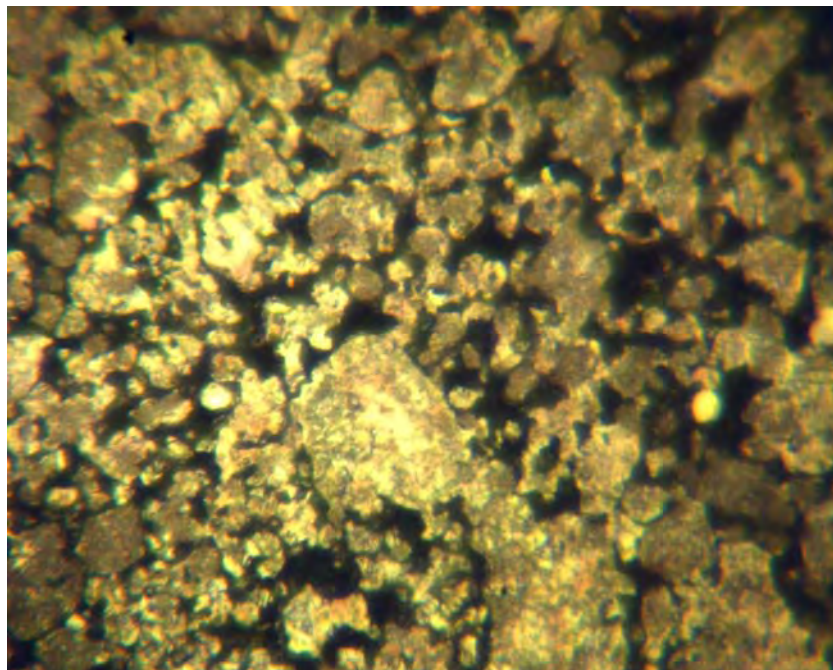


Fig. 3.17 Micrografía del Sinterizado 900°C x 15 minutos. Sin ataque. **500x**.
Fuente: Elaboración propia.

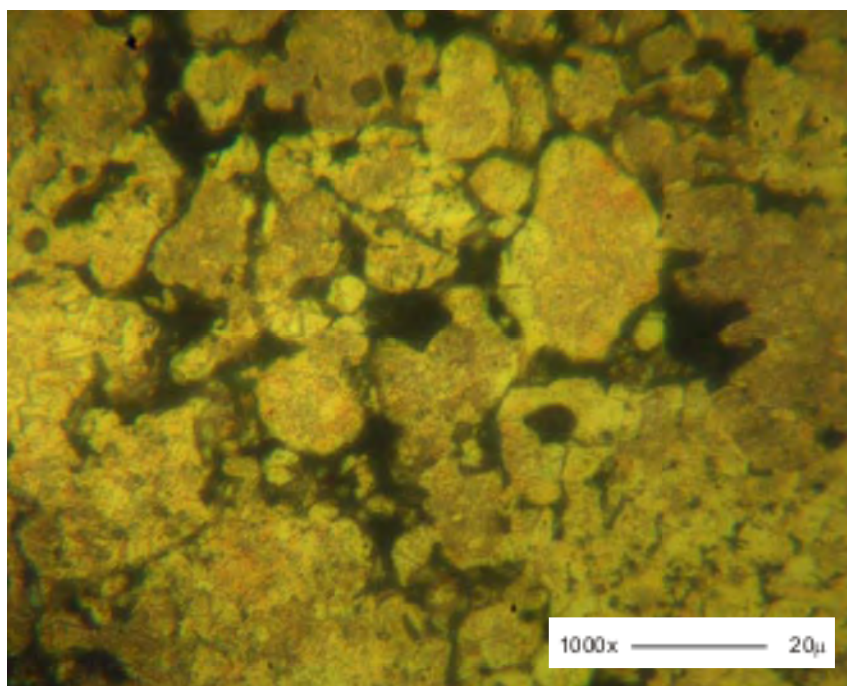


Fig. 3.18 Micrografía del Sinterizado 900°C x 15 minutos. Sin ataque. **1000x**.
Fuente: Elaboración propia.

En las Fig. 3.19 a la 3.21 se presentan las muestras obtenidas después del sinterizado a 900°C durante 20 minutos

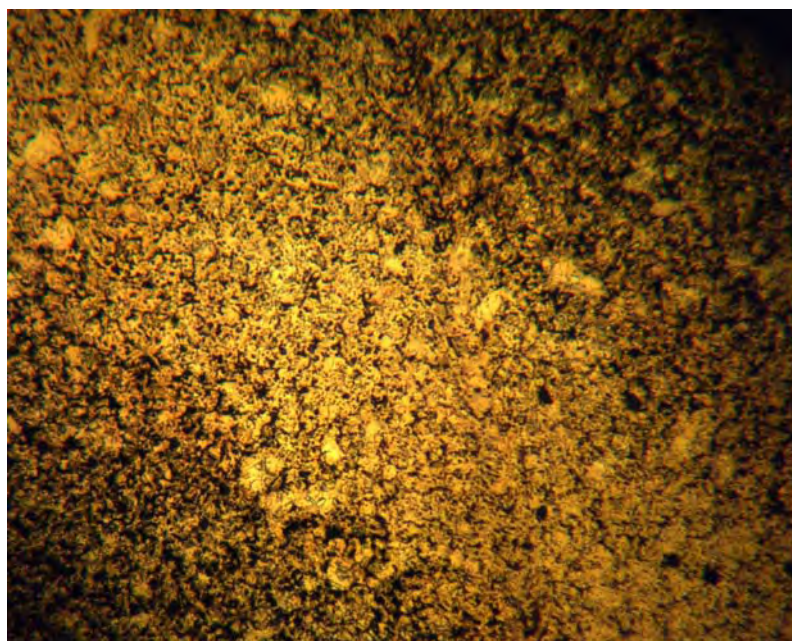


Fig. 3.19 Micrografía del Sinterizado 900°C x 20 minutos. Sin ataque. **100x**.
Fuente: Elaboración propia.

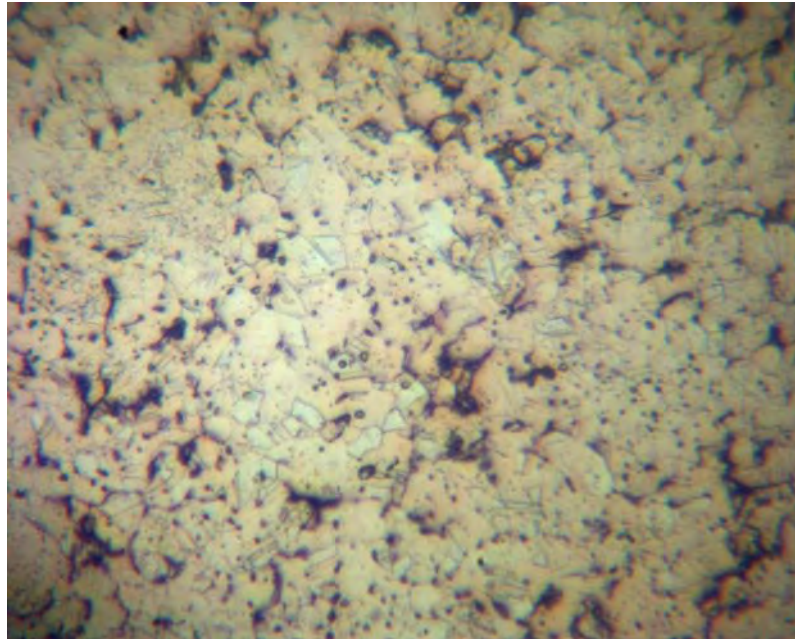


Fig. 3.20 Micrografía del Sinterizado 900°C x 20 minutos. Con ataque. **500x**.
Fuente: Elaboración propia.

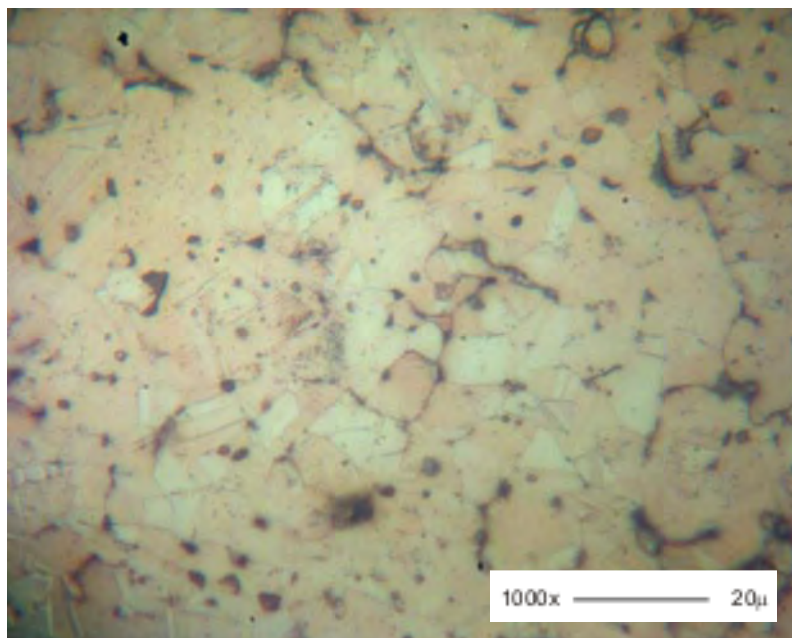


Fig. 3.21 Micrografía del Sinterizado 900°C x 20 minutos. Con ataque. **1000x**.
Fuente: Elaboración propia.

En las Fig. 3.22 a la 3.24 se presentan las muestras obtenidas después del sinterizado a 910°C durante 10 minutos

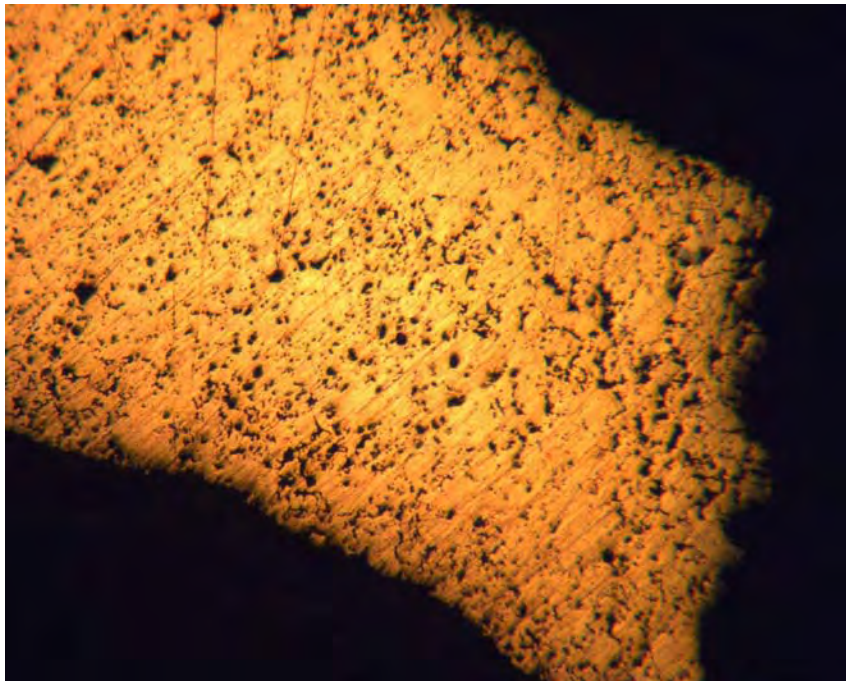


Fig. 3.22 Micrografía del Sinterizado 910°C x 10 minutos. Sin ataque. **100x**.
Fuente: Elaboración propia.

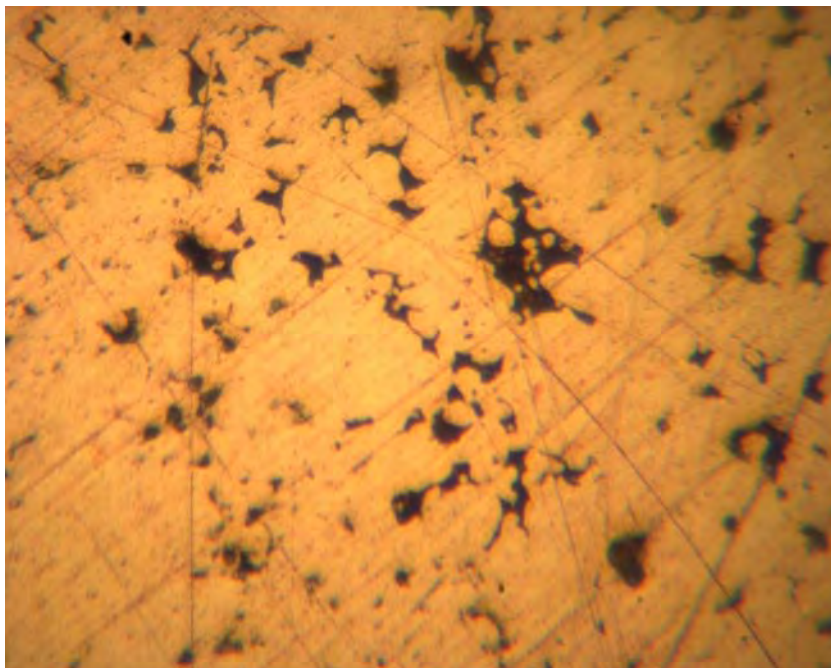


Fig. 3.23 Micrografía del Sinterizado 910°C x 10 minutos. Sin ataque. **500x**.
Fuente: Elaboración propia.

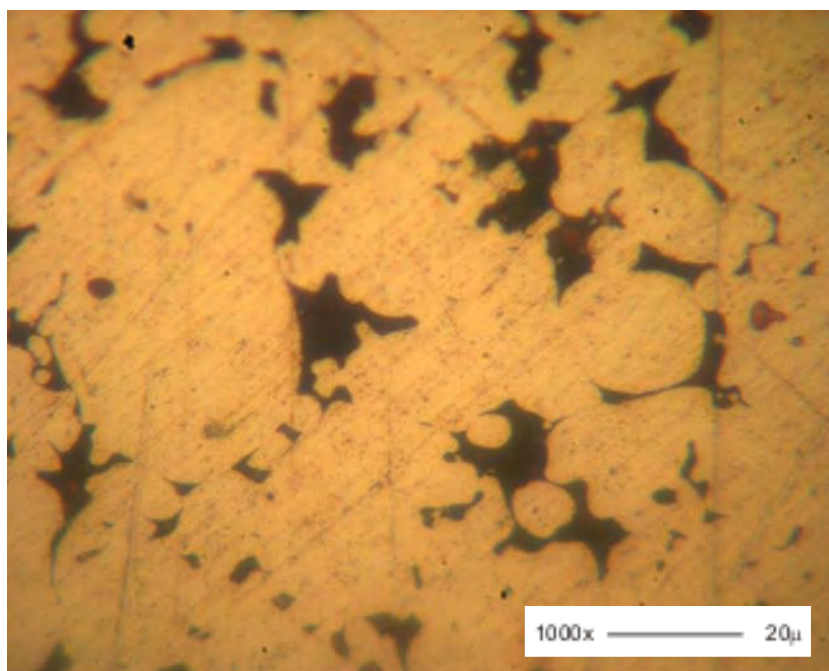


Fig. 3.24 Micrografía del Sinterizado 910°C x 10 minutos. Sin ataque. **1000x**.
Fuente: Elaboración propia.

En las Fig. 3.25 a la 3.27 se presentan las muestras obtenidas después del sinterizado a 910°C durante 15 minutos

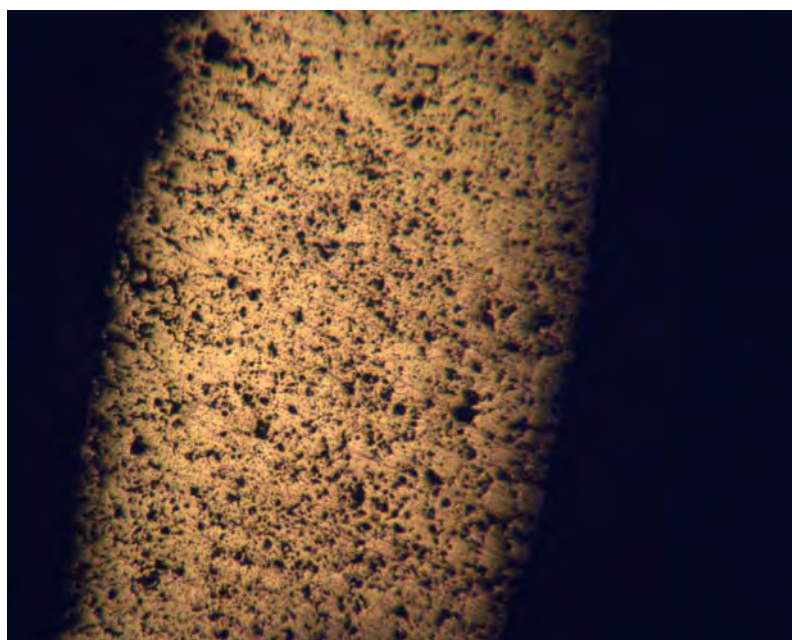


Fig. 3.25 Micrografía del Sinterizado 910°C x 15 minutos. Sin ataque. **100x**.
Fuente: Elaboración propia.

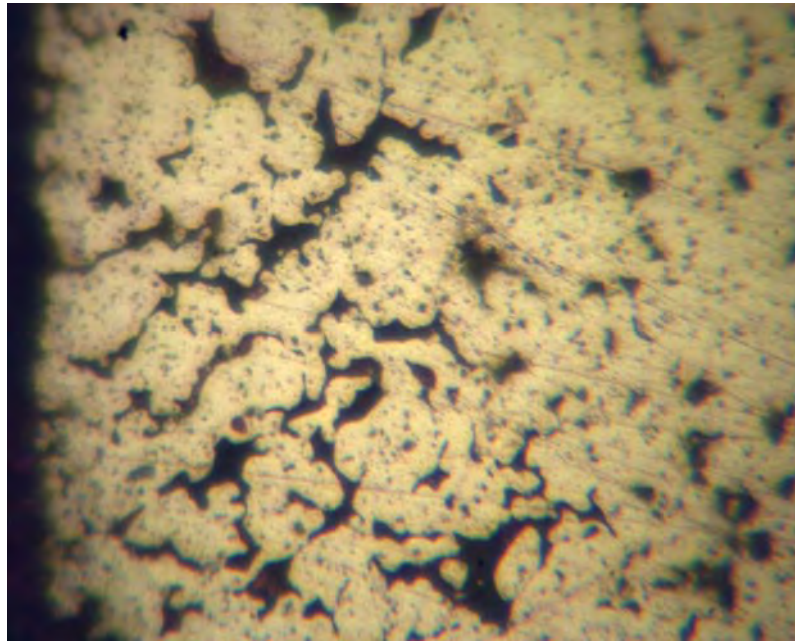


Fig. 3.26 Micrografía del Sinterizado 910°C x 15 minutos. Sin ataque. **500x**.
Fuente: Elaboración propia.

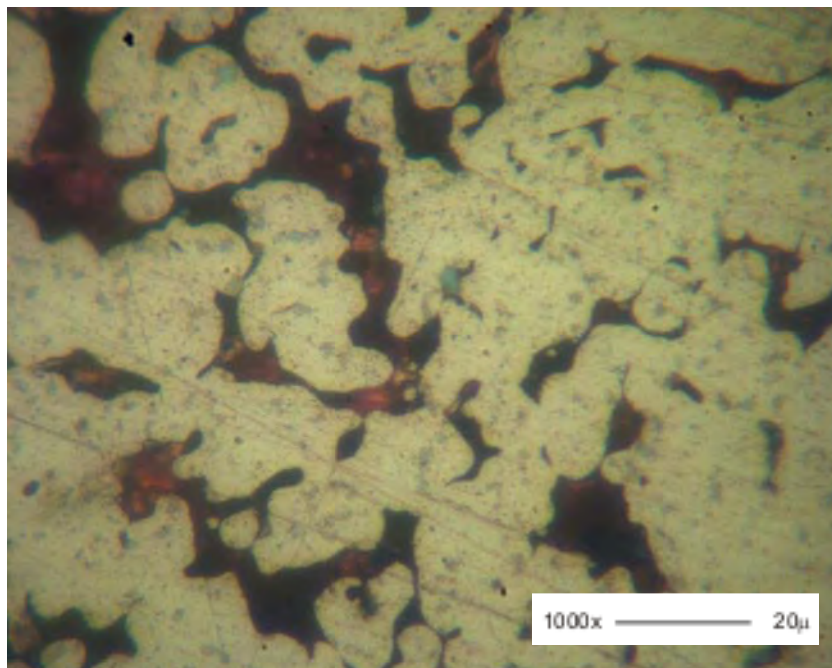


Fig. 3.27 Micrografía del Sinterizado 910°C x 15 minutos. Sin ataque. **1000x**.
Fuente: Elaboración propia.

En las Fig. 3.28 a la 3.30 se presenta las muestras obtenidas después del sinterizado a 910°C durante 20 minutos

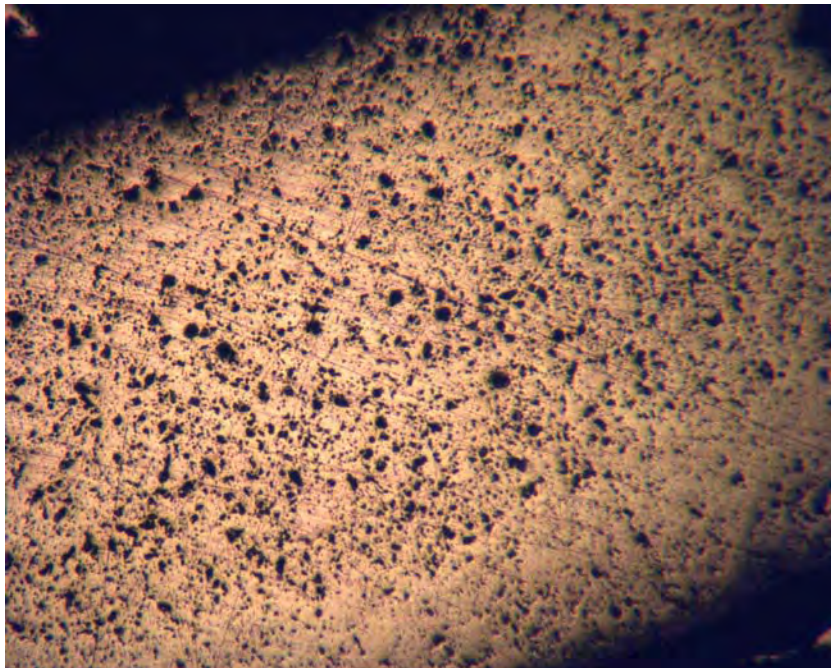


Fig. 3.28 Micrografia del Sinterizado 910°C x 20 minutos. Sin ataque. **100x**.
Fuente: Elaboración propia.

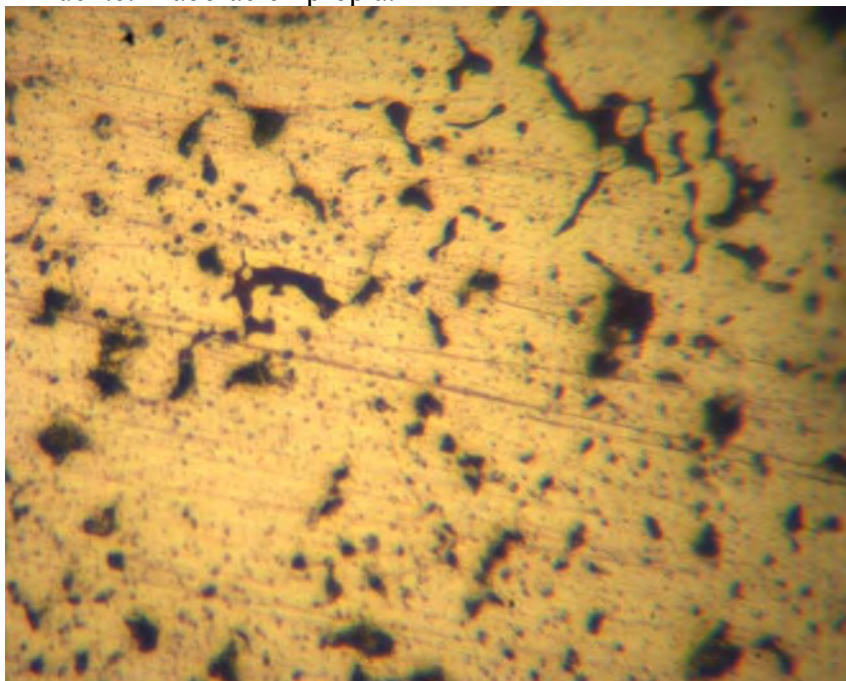


Fig. 3.29 Micrografia del Sinterizado 910°C x 20 minutos. Sin ataque. **500x**.
Fuente: Elaboración propia.

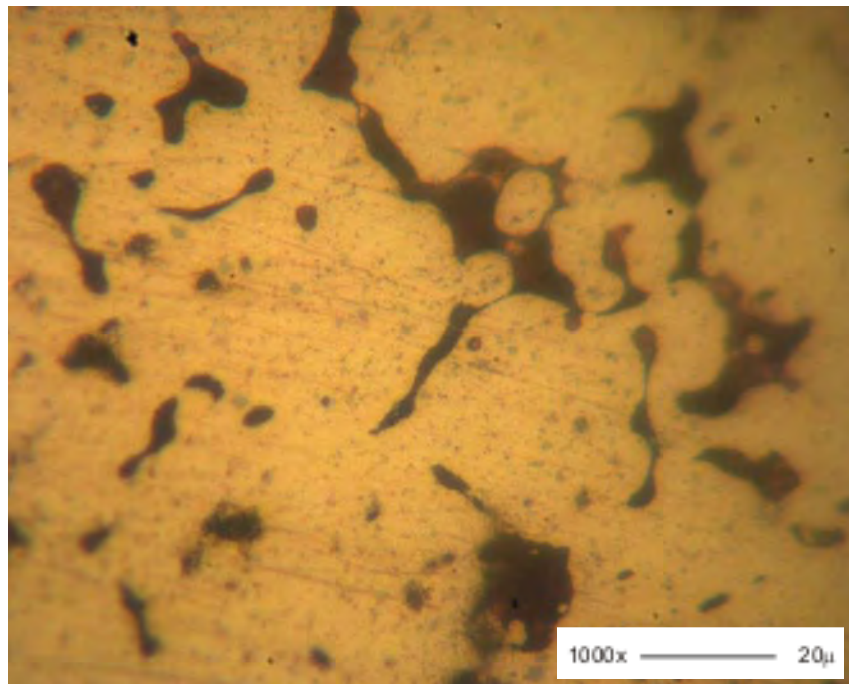


Fig. 3.30 Micrografía del Sinterizado 910°C x 20 minutos. Sin ataque. **1000x**.
Fuente: Elaboración propia.

CAPITULO 4

RESULTADOS

4.1 Introducción

En este capítulo se presenta los gráficos del factor de resistencia de la rotura radial, dureza, cambio dimensional en el diámetro exterior, cambio dimensional en el diámetro interior y cambio dimensional en la longitud, obtenidos de los ensayos de Carga radial y Variación dimensional respectivamente realizados a los cojinetes de la nueva aleación $92\text{Cu}8\text{Zn}1\text{Zn}(\text{C}_{10}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$ en condiciones de sinterizado y calibrado.

El análisis de los gráficos, consiste en interpretar el efecto de la temperatura, el tiempo, el porcentaje de cobre y el porcentaje de zinc; con la finalidad de obtener modelos que nos permita predecir el factor de resistencia de la rotura radial,, el cambio dimensional en el diámetro exterior, el cambio dimensional en el diámetro interior y el cambio dimensional en la longitud.

Finalmente se presenta la composición química, la estructura metalográfica y la formulación de los modelos matemáticos empíricos del factor de resistencia de la rotura radial, del cambio dimensional en el diámetro exterior, del cambio dimensional en el diámetro interior y del cambio dimensional en la longitud de la nueva aleación sinterizada $92\text{Cu}8\text{Zn}1\text{Zn}(\text{C}_{10}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$

4.2 Curvas del factor de resistencia a la rotura radial.

4.2.1 Tratamiento de Sinterizado

La curva de la media del factor de resistencia a la rotura radial, Fig. 4.1, muestra que hay una diferencia significativa entre los bloques que se construyeron para hacer las réplicas del sinterizado a diferentes condiciones de temperatura y tiempo; como es el caso del tratamiento 90020 (a 900°C por 20 minutos) con respecto al tratamiento de sinterizado 88010 (880°C por 10 minutos) de los cuales se obtuvo factores de resistencia a la rotura radial de 8.0 y 12.5 kg/mm² respectivamente.

Media del factor de la resistencia a la rotura radial

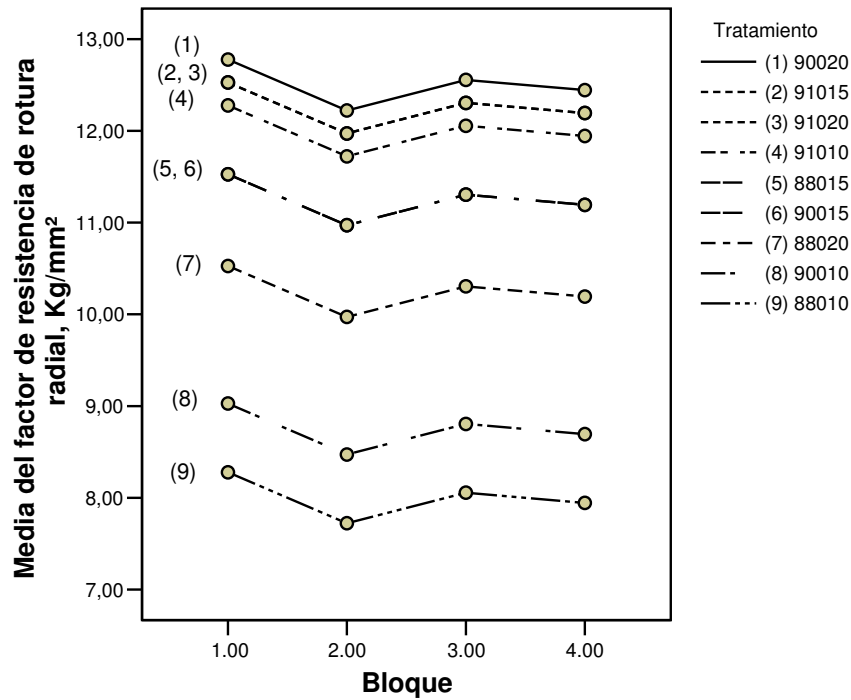


Fig. 4.1 Media del factor de resistencia a la rotura radial en función a los bloques diseñados a diferentes temperaturas y tiempos. Fuente: Elaboración propia.

El efecto del tratamiento de sinterizado en el factor de resistencia a la rotura radial, Fig. 4.2 marca la diferencia entre los valores obtenidos generando un amplio rango para escoger el más adecuado para la fabricación de cojinetes autolubricados : 10,25 kg/mm² a 880°C por 20 minutos, 11.25 kg/mm² a 880°C por 15 minutos y a 900°C por 15 minutos, 12,0 kg/mm² a 910°C por 10 minutos, 12,25 kg/mm² a 910°C por 15 minutos y 910°C por 20 minutos, y 12,5 kg/mm² a 900° por 20 minutos.

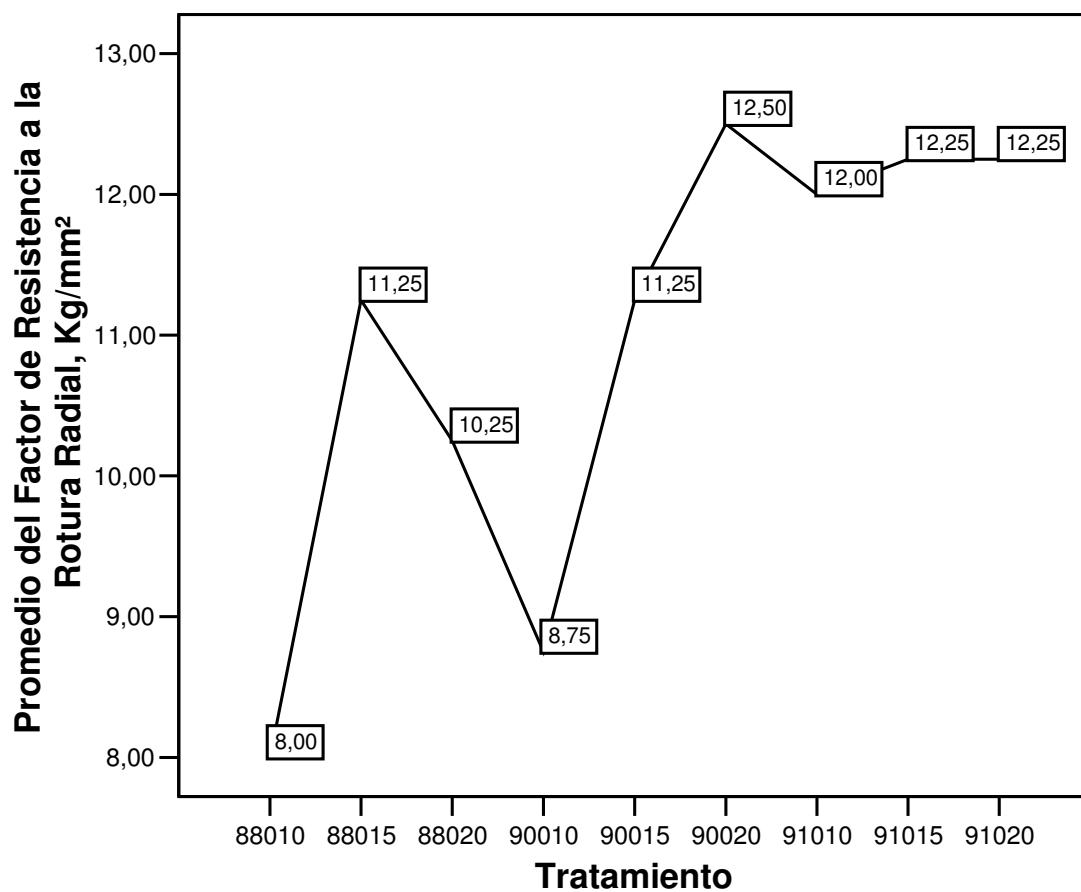


Fig. 4.2 Media del Factor de resistencia a la rotura radial en función al tratamiento de sinterizado. Fuente: Elaboración propia.

Los residuos estandarizados del Factor de resistencia de rotura radial, Fig. 4.3 están dentro del rango aceptable de -2 y $+2$ y todos los valores obtenidos caen alrededor de la recta de normalidad, Fig 4.4.

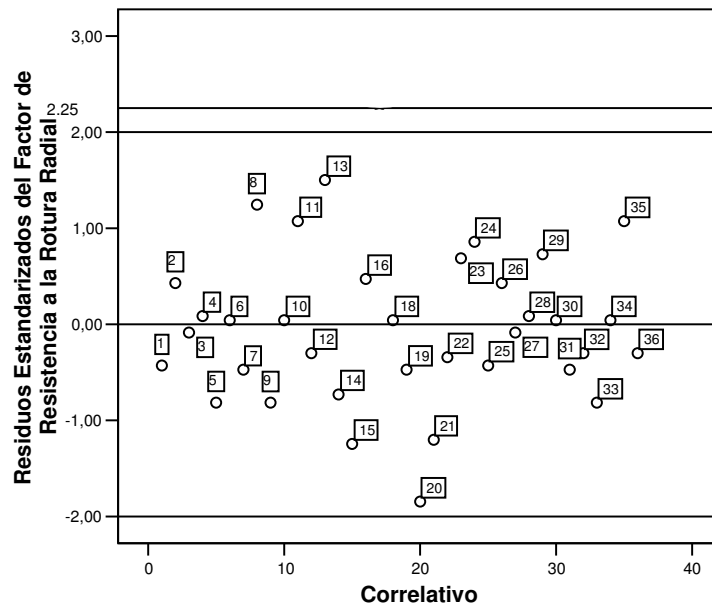


Fig. 4.3. Residuos estandarizados del Factor de resistencia de rotura radial
Fuente: Elaboración propia.

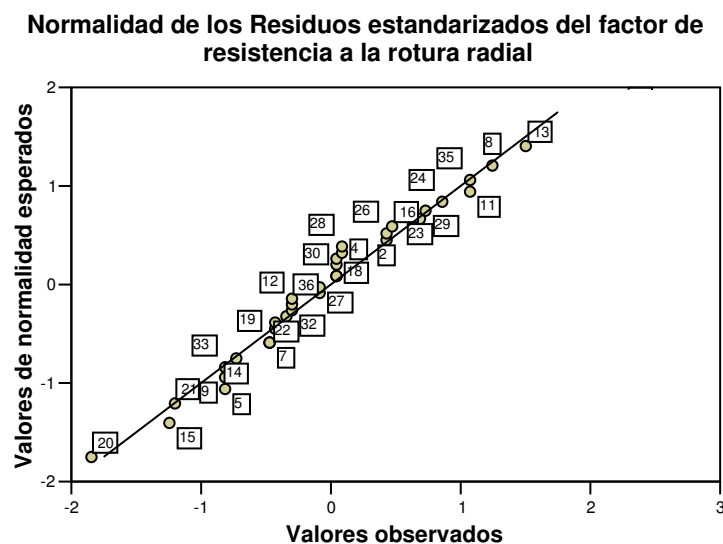


Fig. 4.4. Normalidad de los residuos estandarizados del Factor de resistencia de rotura radial.
Fuente: Elaboración propia.

En las Fig. 4.5 y 4.6, se aprecia como es la distribución del Factor de resistencia a la rotura radial en función de la temperatura y tiempo, gráficos que nos permitirán seleccionar la combinación más adecuada.

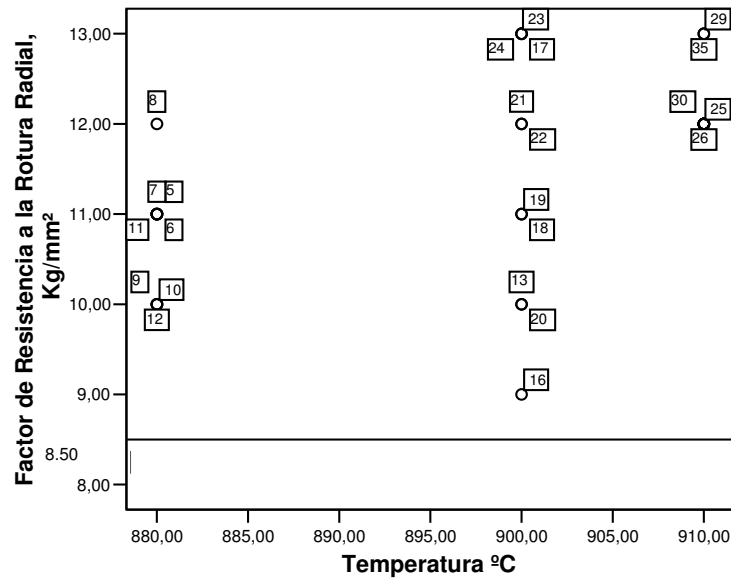


Fig. 4.5 Factor de resistencia a la rotura radial en función de la temperatura.
Fuente: Elaboración propia.

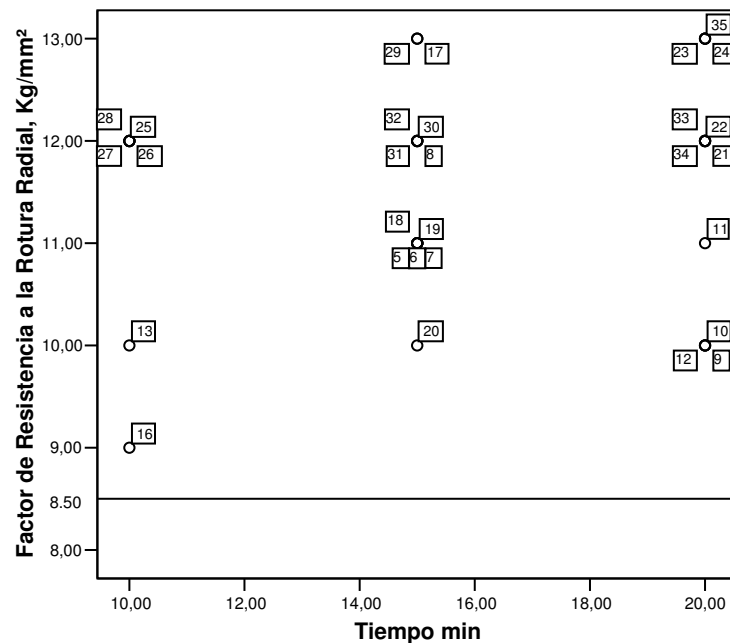


Fig. 4.6 Factor de resistencia a la rotura radial en función del tiempo
Fuente: Elaboración propia.

El factor de resistencia a la rotura radial varia de 8 a 13 kg/mm² cuando el cobre está en un rango de 91-92% (Fig. 4.7) y el zinc está en un rango de 5.5-8.0% (Fig. 4.8).

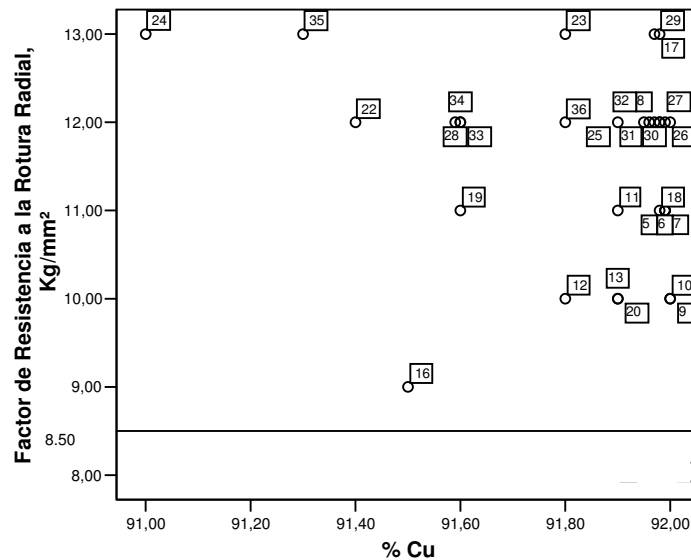


Fig. 4.7 Factor de resistencia a la rotura radial en función al porcentaje de cobre.
Fuente: Elaboración propia.

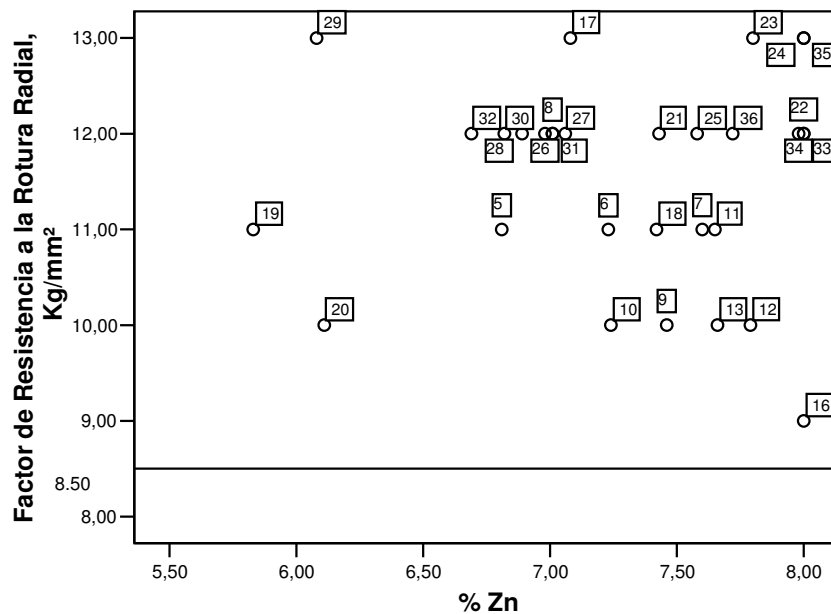


Fig. 4.8 Factor de resistencia a la rotura radial en función al porcentaje de zinc.
Fuente: Elaboración propia.

4.2.2 Regresión Múltiple del factor de resistencia a la rotura radial.

Las Cuadros 4.1, 4.2, 4.3 y las Fig. 4.9 a la 4.13 muestran los resultados del ajuste a un modelo de regresión múltiple para describir la relación entre el Factor de resistencia a la rotura radial y la Temperatura °C, Tiempo minutos, % Cu% y del %Zn

Cuadro 4.1

RESUMEN DEL MODELO DEL FACTOR DE RESISTENCIA A LA ROTURA RADIAL DEL COJINETE SINTERIZADO. (b)			
R	R ²	R ² (ajustado para los grados de libertad)	Error estándar-estimación
,776(a)	,602	,551	1,10928

a Parámetros: (Constante), Temperatura °C, Tiempo min, % Cu% y Zn

b Variable dependiente: Factor de resistencia a la rotura radial, kg/mm²

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 4.2.

ANOVA DEL FACTOR DE RESISTENCIA A LA ROTURA RADIAL (b) DEL COJINETE SINTERIZADO.					
	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	Sig.
Modelo	57,743	4	14,436	11,732	,000(a)
Residuo	38,145	31	1,230		
Total	95,889	35			

a Parámetros: (Constante), Temperatura °C, Tiempo min, % Cu% y Zn

b Variable dependiente: Factor de resistencia a la rotura radial, kg/mm²

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 4.3

COEFICIENTES DEL FACTOR DE RESISTENCIA A LA ROTURA RADIAL (a) DEL COJINETE SINTERIZADO.				
Parámetro	Error estimación		t	Sig.
	B	Error estándar		
(Constante)	-119,380	93,511	-1,277	,211
Temperatura °C	,079	,016	4,986	,000
Tiempo min	,230	,051	4,502	,000
% Cu	,623	,948	,658	,516
% Zn	-,152	,356	-,427	,672

a Variable dependiente: Factor de resistencia a la rotura radial, kg/mm².
Fuente: Elaboración propia.

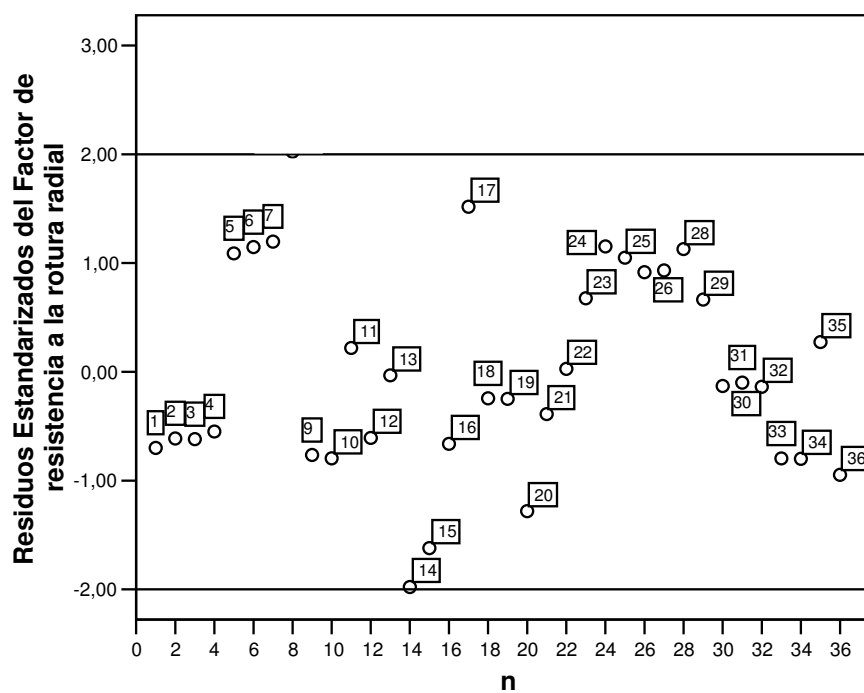


Fig. 4.9 Residuos del Factor de resistencia a la rotura radial en función del número de datos.

Fuente: Elaboración propia.

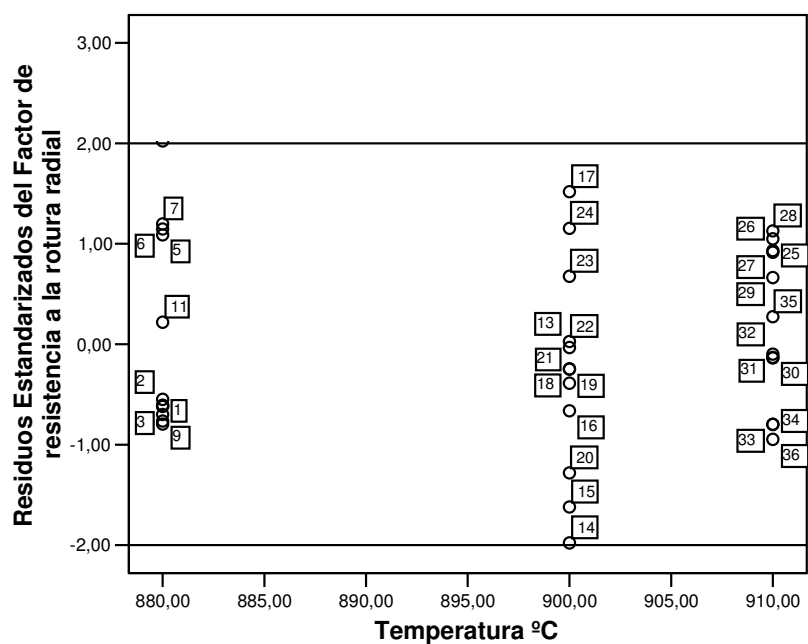


Fig. 4.10 Residuos del Factor de resistencia a la rotura radial en función a la temperatura.
Fuente: Elaboración propia.

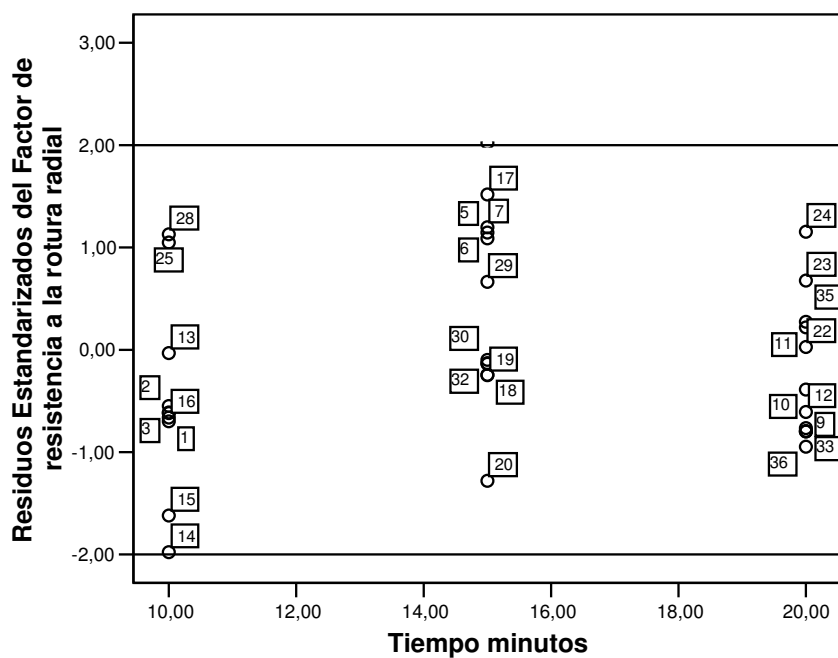


Fig. 4.11 Residuos del Factor de resistencia a la rotura radial en función del tiempo.
Fuente: Elaboración propia.

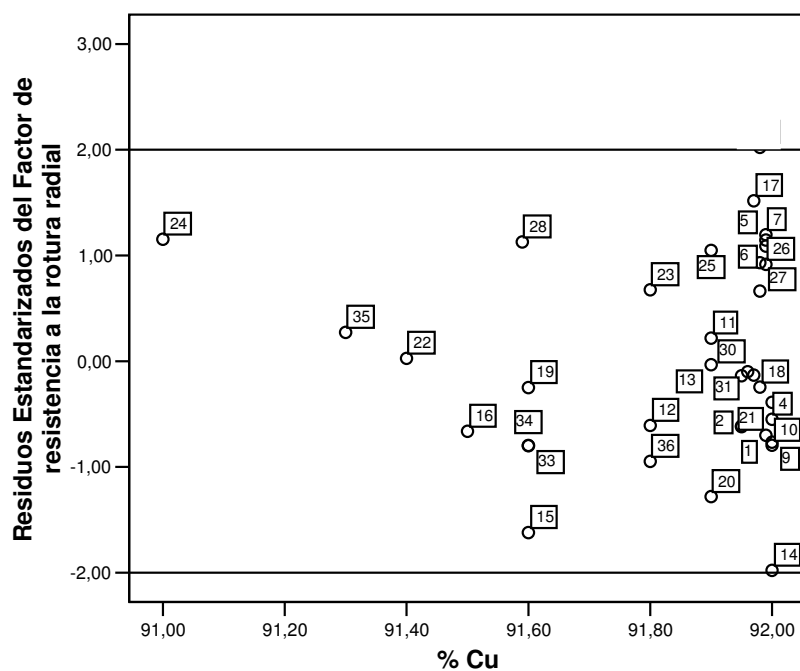


Fig. 4.12 Residuos del Factor de resistencia a la rotura radial en función del %Cu.
Fuente: Elaboración propia.

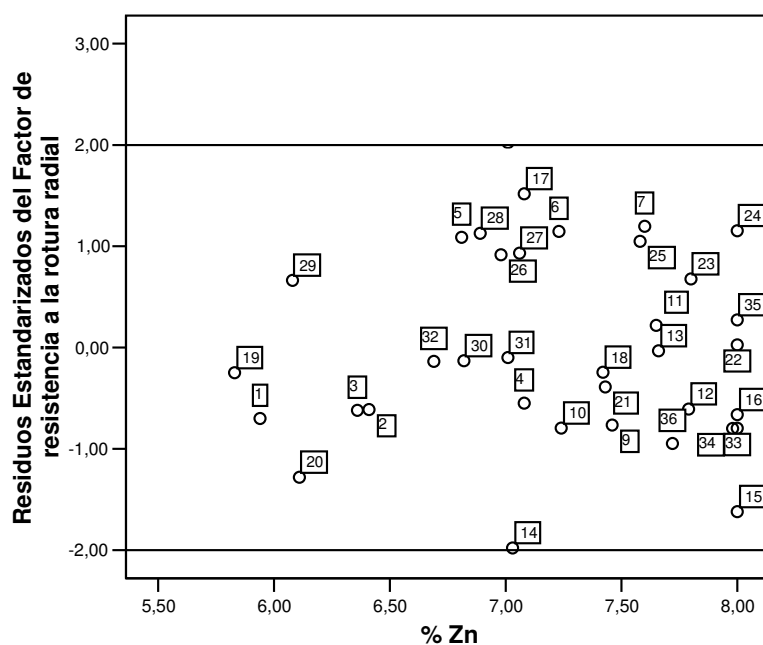


Fig. 4.13 Residuos del Factor de resistencia a la rotura radial en función al %Zn.
Fuente: Elaboración propia.

4.3 Curvas del Cambio dimensional en el diámetro exterior

4.3.1 Tratamiento de sinterizado

Los resultados del Cambio dimensional en el diámetro exterior son presentados, Fig. 4.14 y notamos que hay un cambio dimensional en el diámetro exterior de negativo que varía desde -0.31 hasta -2.79, para sinterizados a 900° por 10 minutos hasta 900° por 20 minutos, respectivamente

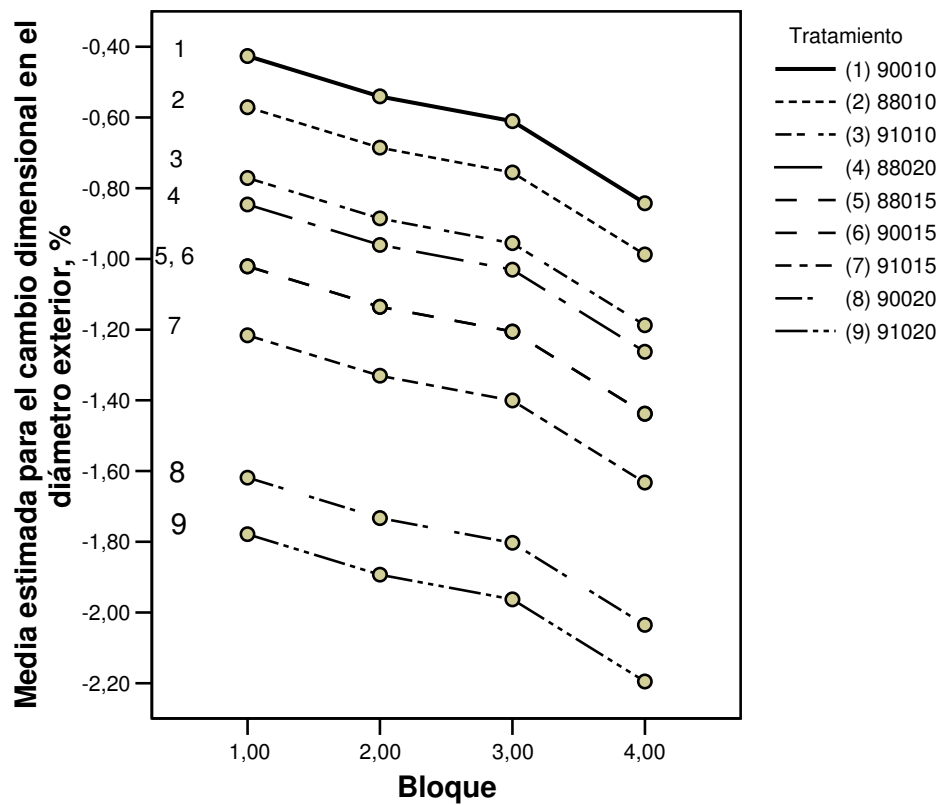


Fig. 4.14 Media del Cambio dimensional en el diámetro exterior en función a los bloques diseñados a diferentes temperaturas y tiempos.
Fuente: Elaboración propia

El cambio dimensional en el diámetro exterior varia con el sinterizado a diferentes temperaturas y tiempos como se muestra en la Fig. 4.15, el porcentaje de variación es desde -0.605 hasta -1.96 para sinterizados a 900°C por 10 minutos y a 910°C por 20 minutos respectivamente.

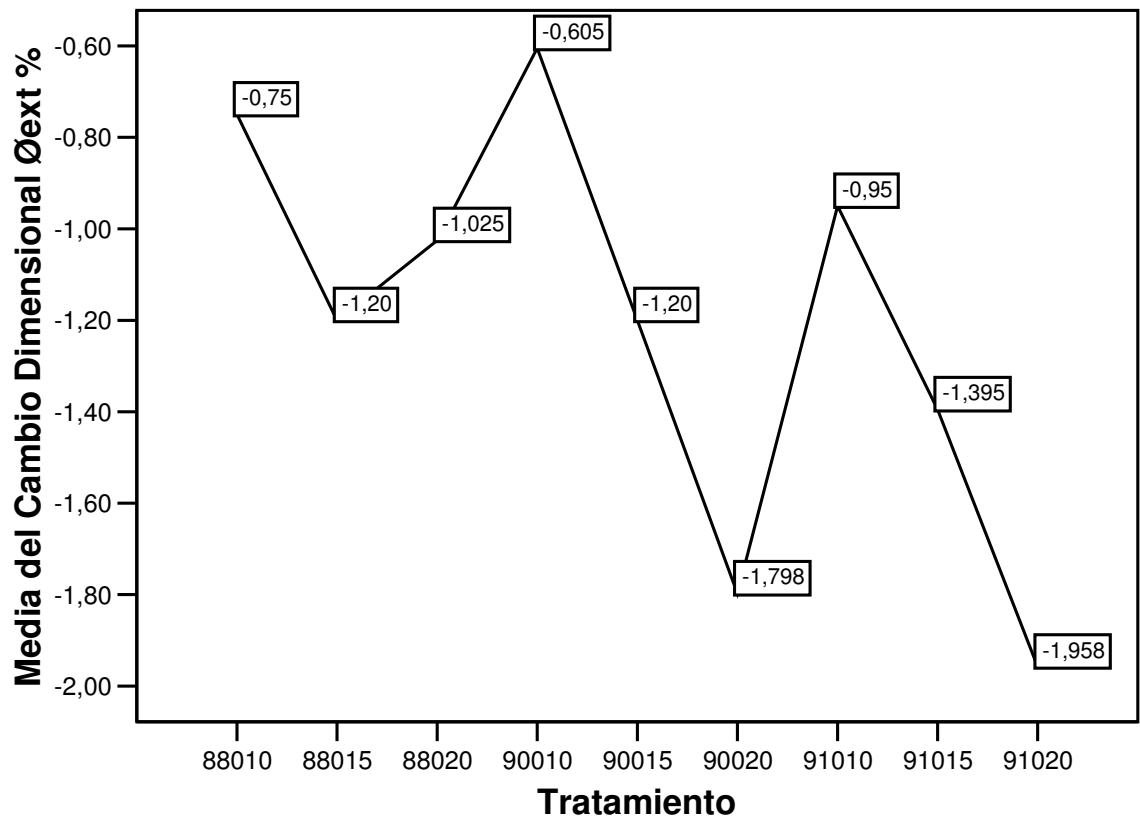


Fig. 4.15 Media del Cambio dimensional en el diámetro exterior en función al tratamiento de sinterizado.
Fuente: Elaboración propia

Con respecto a los residuos estandarizados del Cambio dimensional en el diámetro exterior, Fig. 4.16 se ubican en el rango de -2 y +2 que estadísticamente es aceptable y los valores obtenidos están alrededor de recta de normalidad, Fig. 4.17

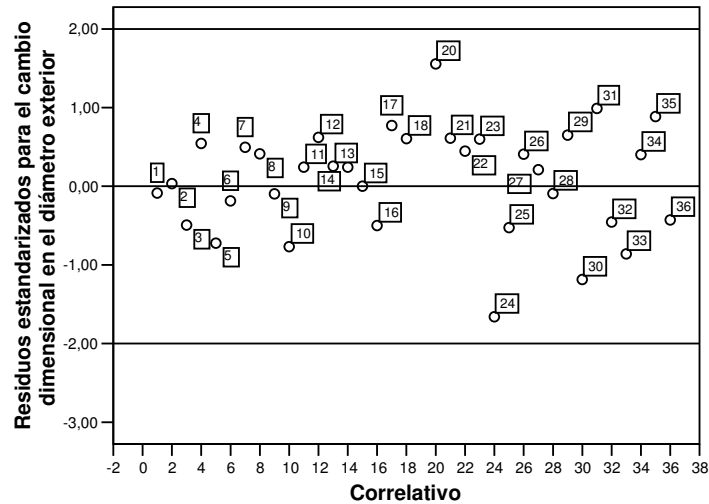


Fig. 4.16 Residuos del Cambio dimensional en el diámetro exterior en función del número de datos.
Fuente Elaboración propia.

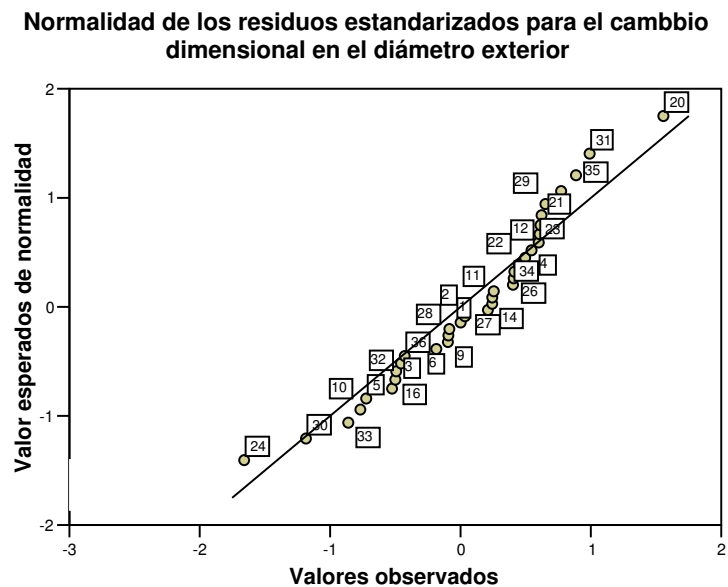


Fig. 4.17 Normalidad de los residuos del Cambio dimensional en el diámetro exterior
Fuente: Elaboración propia

En las Fig. 4.18 y 4.19 se muestra como es la distribución de los valores del cambio dimensional en el diámetro exterior con respecto a la temperatura y el tiempo, estos gráficos nos permitirán elegir la combinación más adecuada de temperatura y tiempo para el sinterizado.

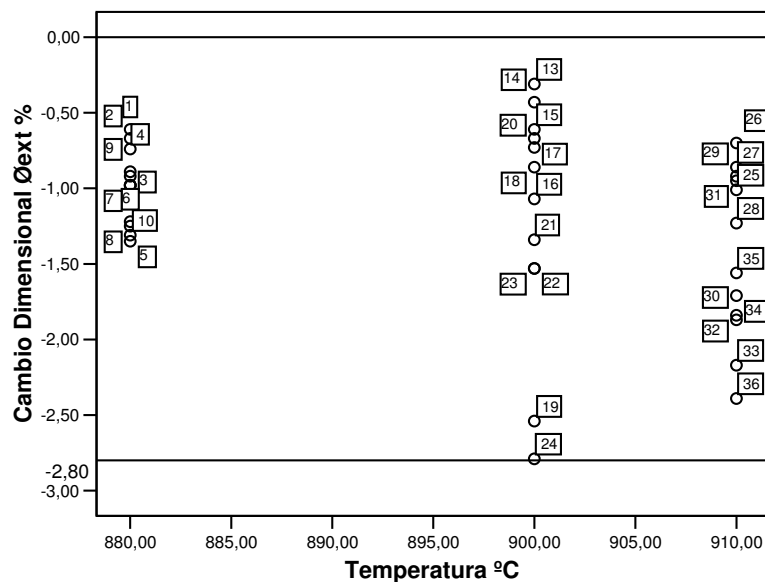


Fig. 4.18 Cambio dimensional en el diámetro exterior en función a la temperatura.
Fuente: Elaboración propia

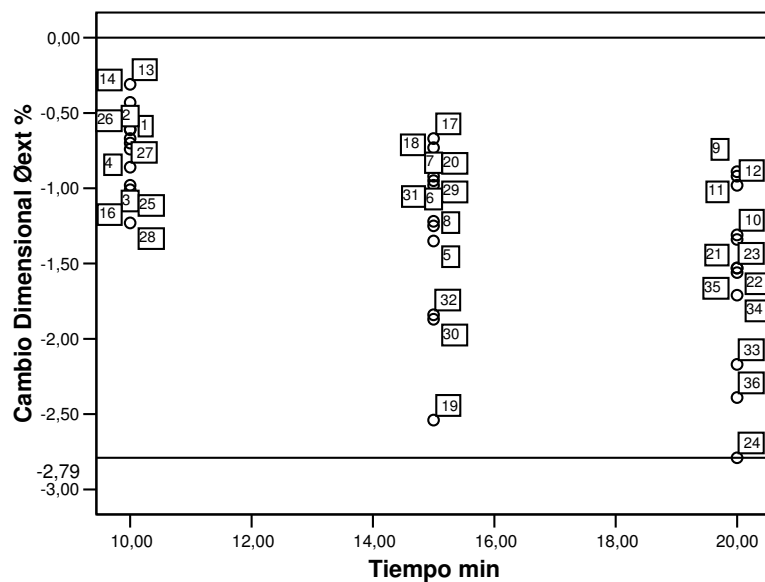


Fig. 4.19 Cambio dimensional en el diámetro exterior en función al tiempo.
Fuente: Elaboración propia.

El cambio dimensional en el diámetro exterior varía en función a 91-92%Cu, Fig. 4.20 y 5.83-8.00 %Zn, Fig. 4.21

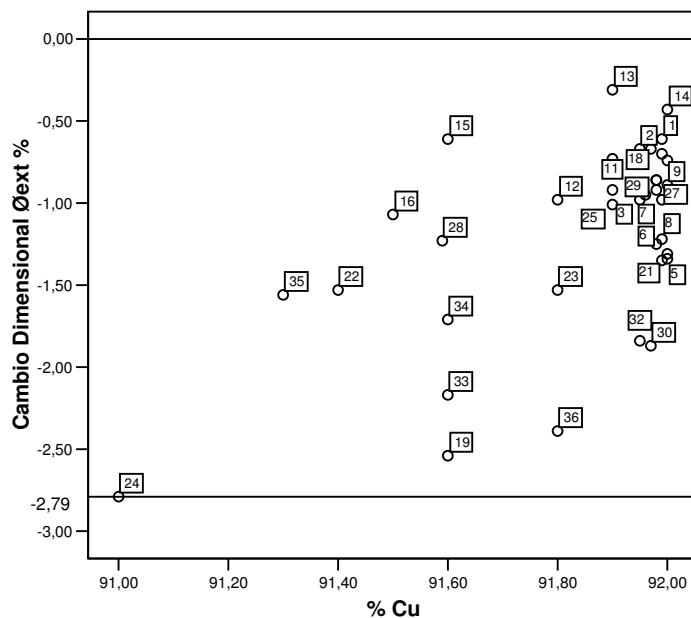


Fig. 4.20 Cambio dimensional en el diámetro exterior en función al %Cobre
Fuente: Elaboración propia

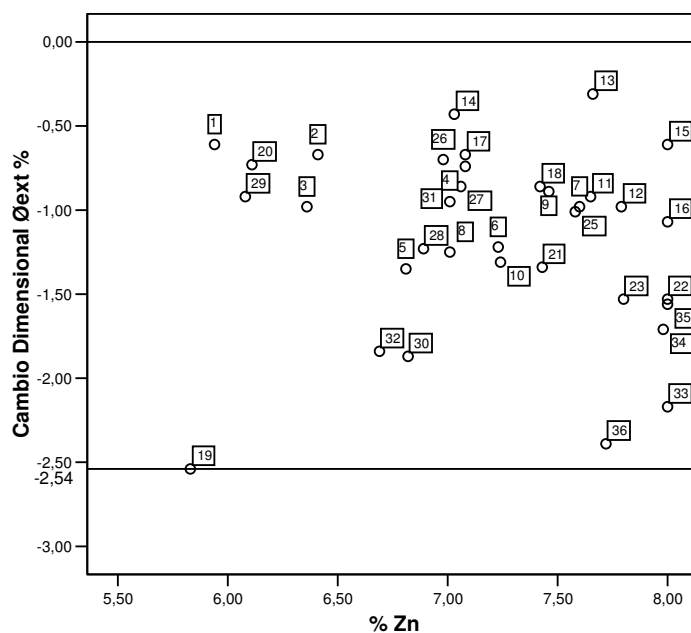


Fig. 4.21 Cambio dimensional en el diámetro exterior en función al % de zinc.
Fuente: Elaboración propia

4.3.2 Regresión Múltiple del Cambio dimensional en el diámetro exterior.

Las Cuadros 4.4, 4.5 y 4.6 y las Fig. 4.22 a la 4.26 muestran los resultados del ajuste a un modelo de regresión múltiple para describir la relación entre el Cambio dimensional en el diámetro exterior y la temperatura °C, el tiempo en minutos, el % de cobre y el % de zinc.

Cuadro 4.4

RESUMEN DEL MODELO DEL CAMBIO DIMENSIONAL EN EL DIÁMETRO EXTERIOR (b) DEL COJINETE SINTERIZADO.			
R	R ²	R ² (ajustado para los grados de libertad)	Error estándar-estimación
,781(a)	,610	,560	,39271

a Parámetros: (Constante), % Zn, Temperatura °C, Tiempo min, % Cu

b Variable dependiente: Cambio dimensional Øext %

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 4.5

ANOVA DEL CAMBIO DIMENSIONAL EN EL DIÁMETRO EXTERIOR (b)					
	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	Sig.
Modelo	7,491	4	1,873	12,144	,000(a)
Residuo	4,781	31	,154		
Total	12,272	35			

a Parámetros: (Constante), % Zn, Temperatura °C, Tiempo min, % Cu

b Variable dependiente: Cambio Dimensional Øext %

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 4.6

COEFICIENTES DEL CAMBIO DIMENSIONAL EN EL DIAMETRO EXTERIOR (a) DEL COJINETE SINTERIZADO.				
Parámetro	Error estimación		t	Sig.
	B	Error estándar		
Constante	-107,795	33,105	-3,256	,003
Temperatura °C	-,009	,006	-1,555	,130
Tiempo min	-,081	,018	-4,496	,000
% Cu	1,235	,336	3,680	,001
% Zn	,310	,126	2,456	,020

a Variable dependiente: Cambio Dimensional \varnothing_{ext} %.

Fuente: Elaboración propia.

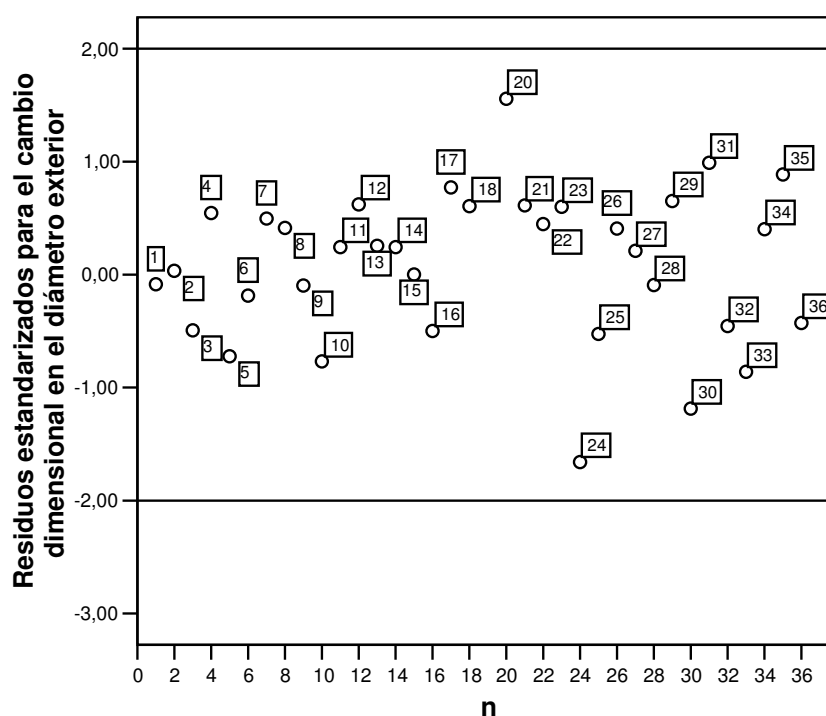


Fig. 4.22 Residuos del Cambio dimensional en el diámetro exterior en función del número de datos.

Fuente: Elaboración propia.

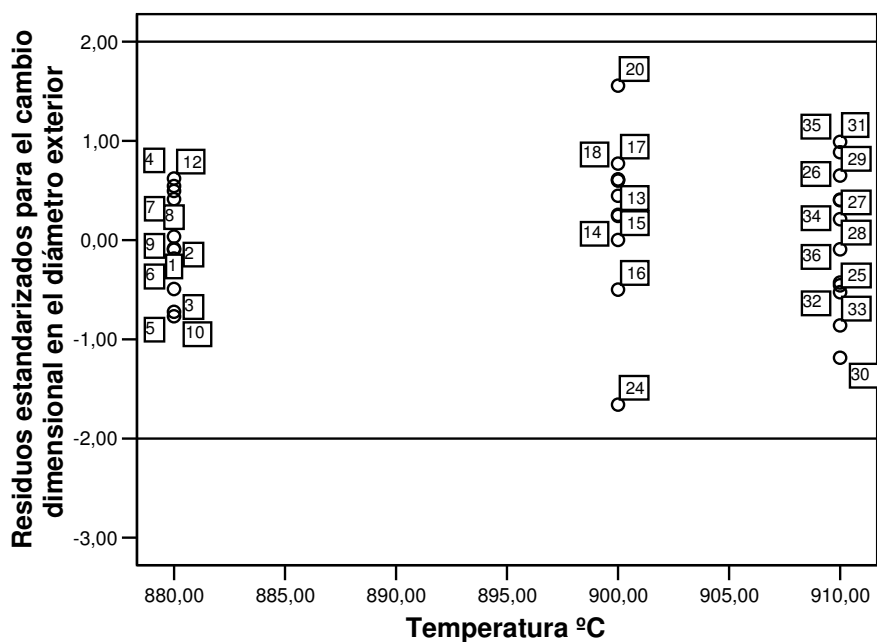


Fig. 4.23 Residuos del Cambio dimensional en el diámetro exterior en función de la temperatura.
Fuente: Elaboración propia.

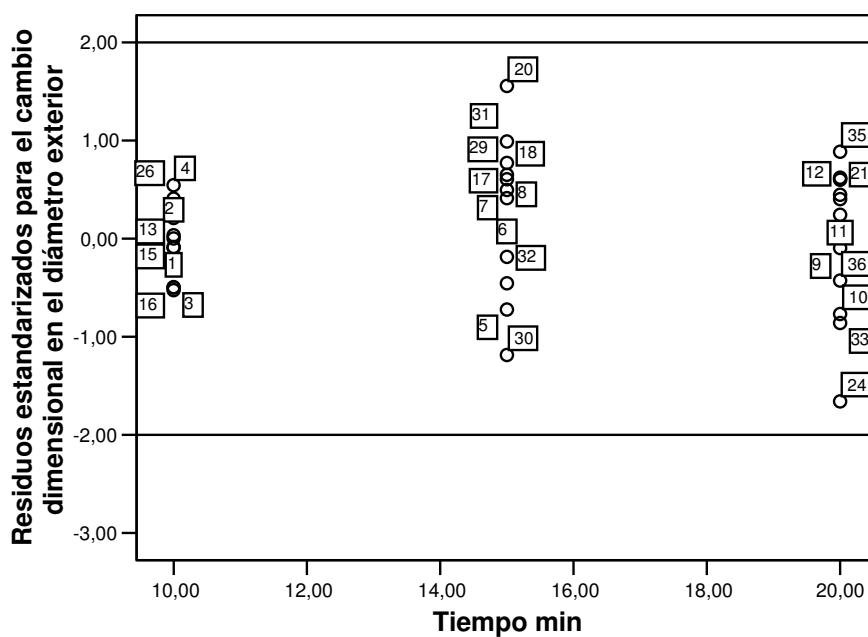


Fig. 4.24 Residuos del Cambio dimensional en el diámetro exterior en función del tiempo.
Fuente: Elaboración propia.

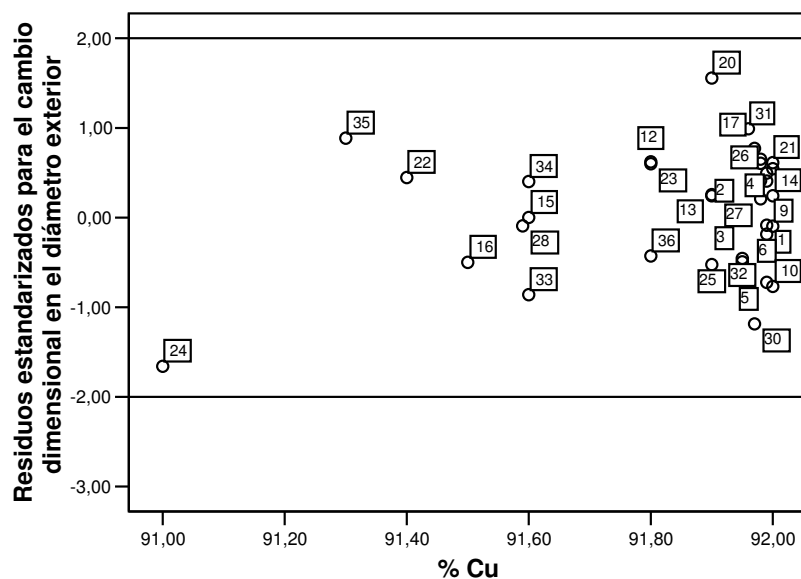


Fig. 4.25 Residuos del Cambio dimensional en el diámetro exterior en función del % de Cobre.
Fuente: Elaboración propia.

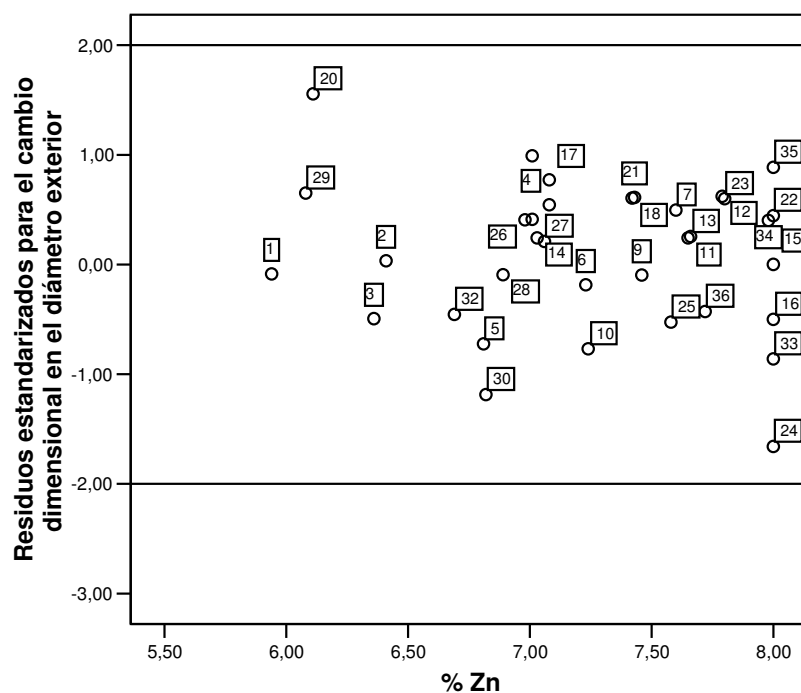


Fig. 4.26 Residuos del Cambio dimensional en el diámetro exterior en función del % de Zinc.
Fuente: Elaboración propia.

4.4 Curvas del Cambio dimensional en el diámetro interior

4.4.1 Tratamiento de sinterizado

La Fig. 4.27 muestra la media del Cambio dimensional en el diámetro interior en función a los bloques que se diseñaron para hacer las réplicas del sinterizado a diferentes condiciones de temperatura y tiempo y vemos que hay una diferencia entre el tratamiento 88010 (a 880°C por 10 minutos) y el tratamiento 88020 (a 880°C por 20 minutos) en los cuales se obtuvieron cambios dimensionales en el diámetro interior de -0.55 a -2.48% respectivamente.

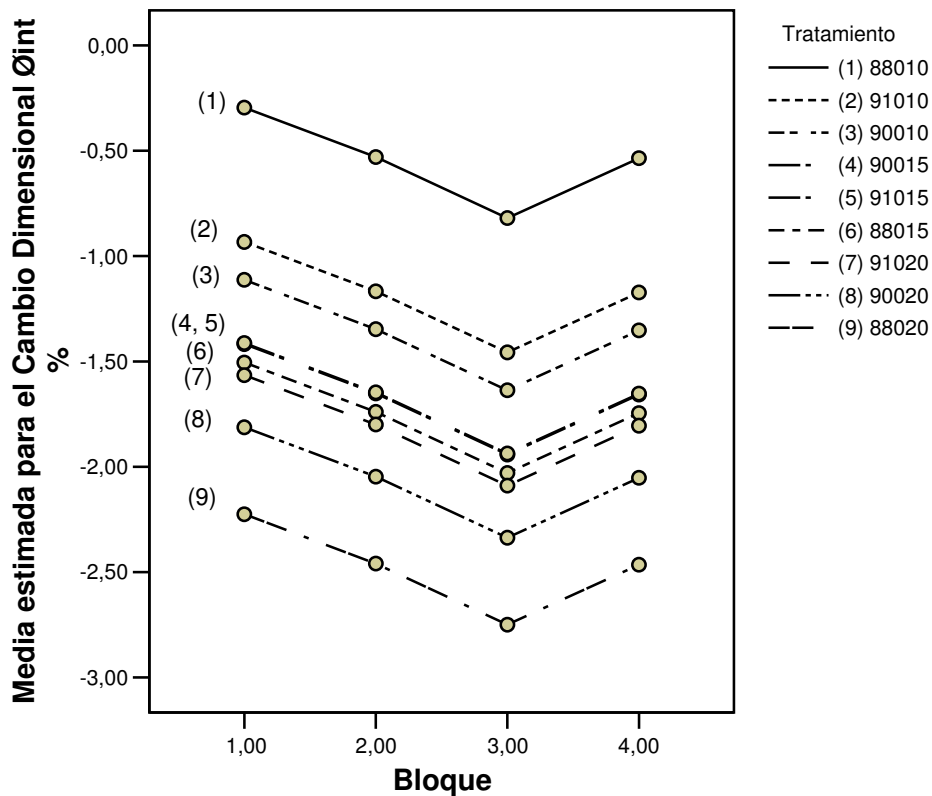


Fig. 4.27 Media del Cambio dimensional en el diámetro interior en función a los bloques diseñados a diferentes temperaturas y tiempos.

Fuente: Elaboración propia.

La Fig. 4.28 muestra el efecto del tratamiento de sinterizado en el cambio dimensional del diámetro interior y marca la diferencia entre los valores obtenidos generando un rango aceptable que nos permitirá escoger el más adecuado para la fabricación de cojinetes autolubricados : -0.55% a 880°C por 10 minutos, -1.18% a 910°C por 10 minutos, 1.36% a 900°C por 10 minutos, inclusive escoger -2.48% a 880°C por 20 minutos que a pesar de ser el más alejado, está dentro del rango.

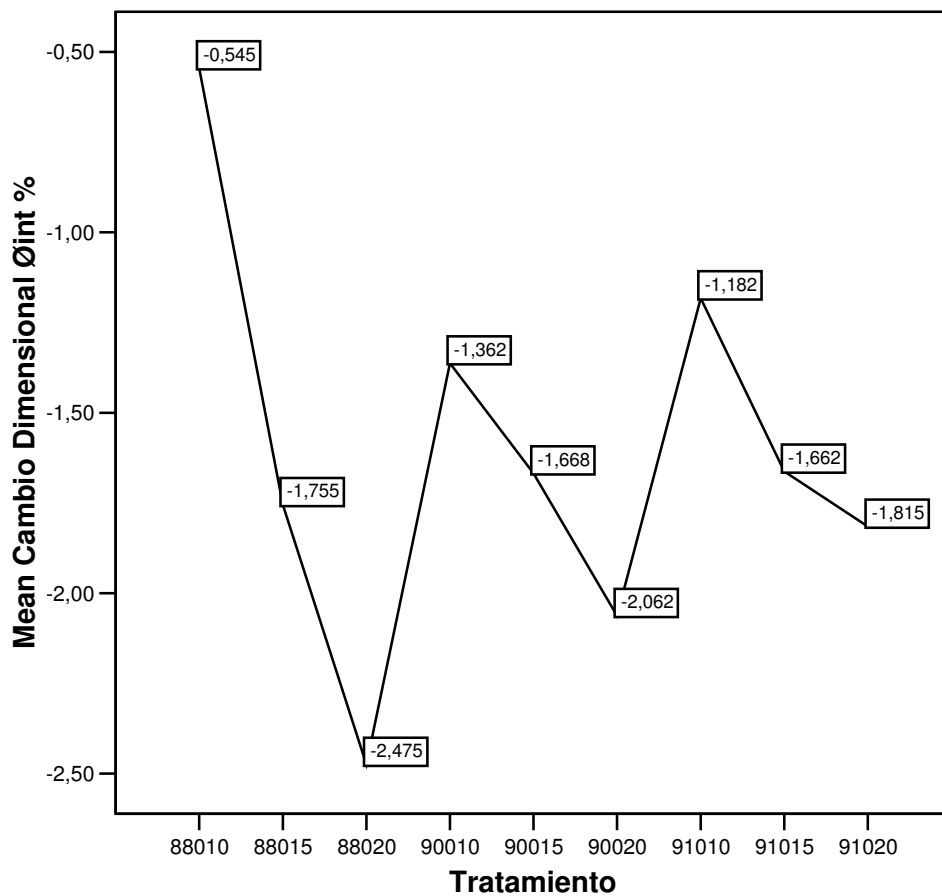


Fig. 4.28 Media del Cambio dimensional en el diámetro interior en función al tratamiento de sinterizado.
Fuente: Elaboración propia

Los residuos estandarizados del Cambio dimensional en diámetro interior, Fig. 4.29 están dentro del rango aceptable de -2 y +2 y todos los valores obtenidos caen alrededor de la recta de normalidad, Fig. 4.30.

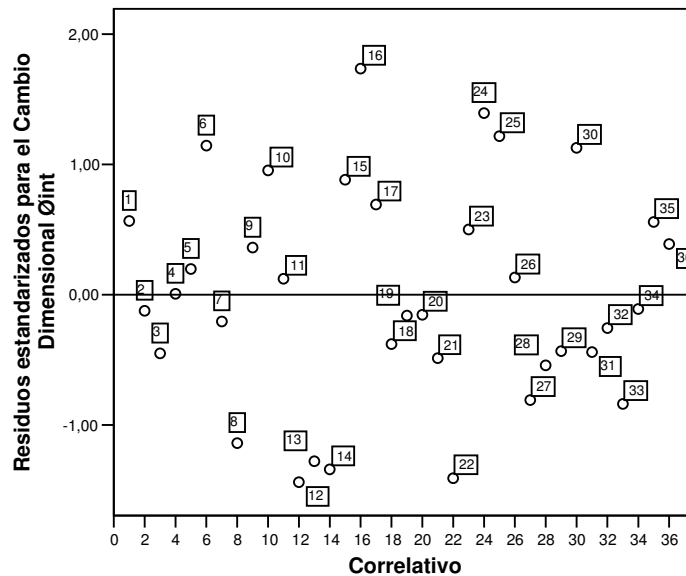


Fig. 4.29 Residuos estandarizados del Cambio dimensional en el diámetro interior.
Fuente: Elaboración propia

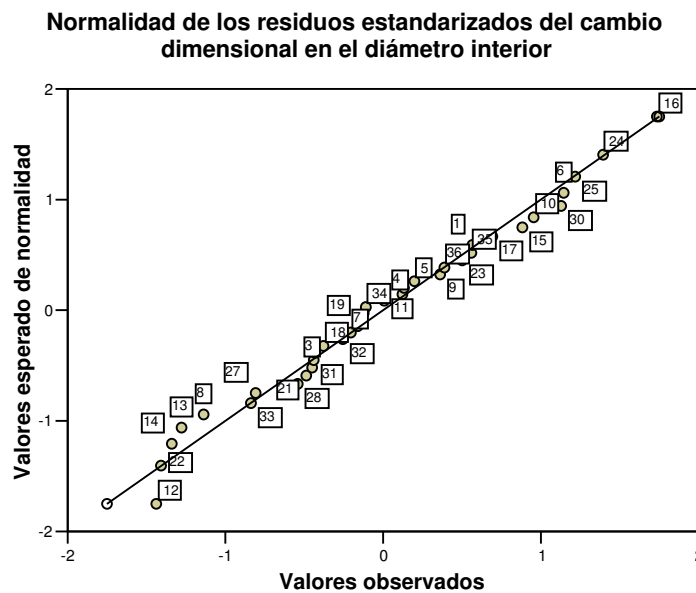


Fig. 4.30 Normalidad de los residuos estandarizados del Cambio dimensional en el diámetro interior.
Fuente: Elaboración propia.

En las Fig. 4.31 y 4.32, se ve como es la distribución del cambio dimensional en el diámetro interior en función de la temperatura y tiempo, gráficos que nos permitirán seleccionar la combinación más adecuada.

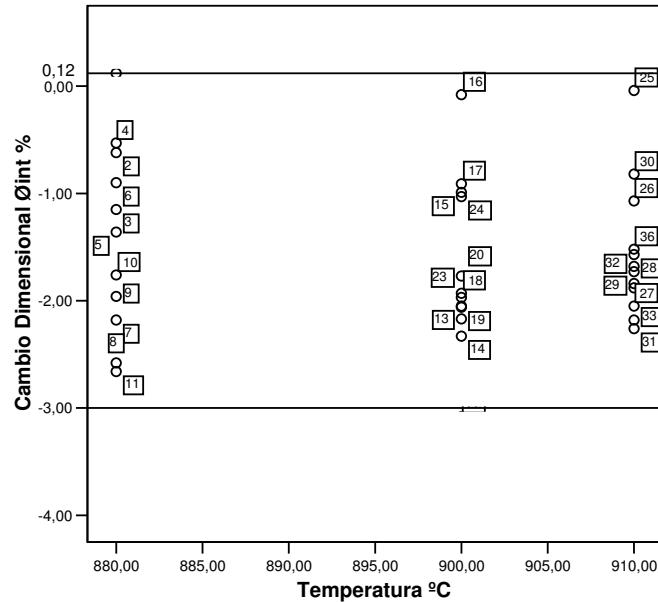


Fig. 4.31 El Cambio dimensional en el diámetro interior en función de la temperatura.

Fuente: Elaboración propia

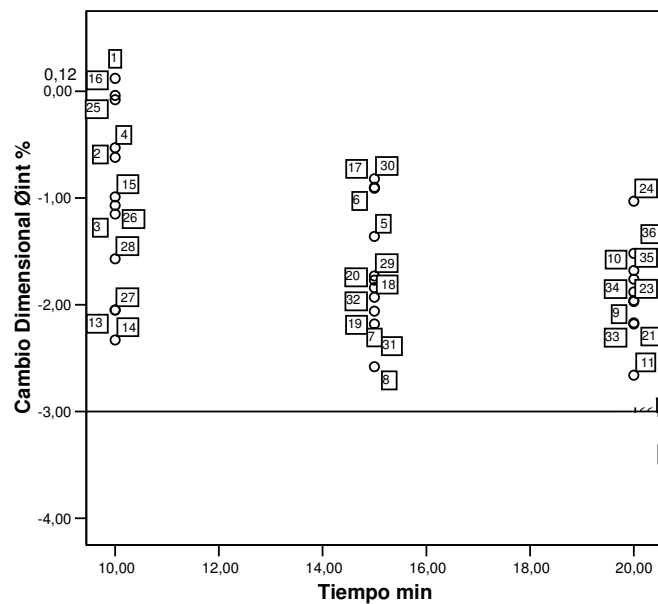


Fig. 4.32 El Cambio dimensional en el diámetro interior en función del tiempo.

Fuente: Elaboración propia

El Cambio dimensional en el diámetro interior, varía de 0.12 a -3.5% cuando el cobre está en un rango de 91-92% (Fig. 4.33) y el zinc en un rango de 5.5-8.0% (Fig. 4.34).

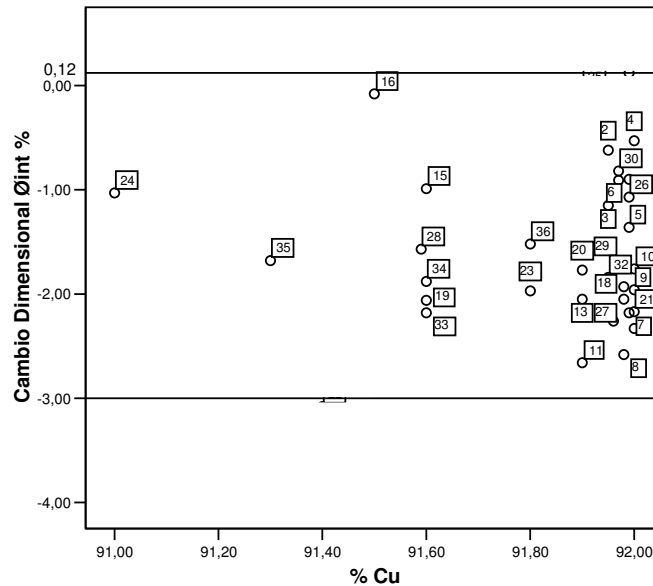


Fig. 4.33 El Cambio dimensional en el diámetro interior en función al porcentaje de cobre.
Fuente: Elaboración propia

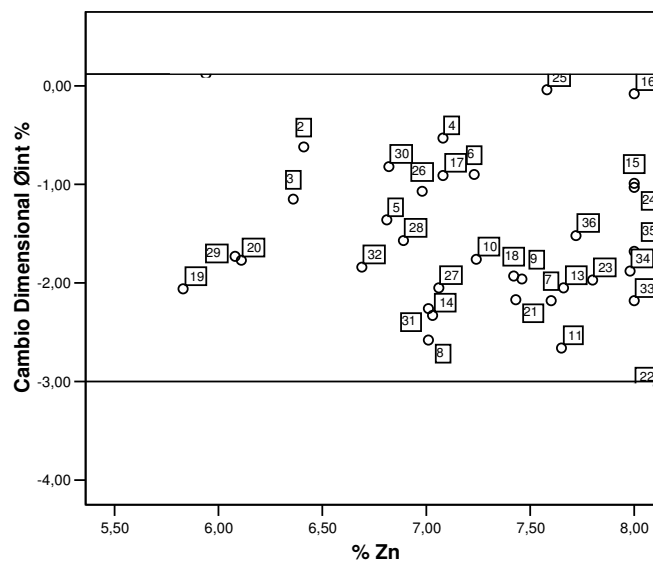


Fig. 4.34 Cambio dimensional en el diámetro interior en función al porcentaje de zinc.
Fuente: Elaboración propia

4.4.2 Regresión Múltiple del Cambio dimensional en el diámetro interior

Las Cuadros 4.7, 4.8 y 4.9 y las Fig. 4.35 a la 4.39 muestran los resultados del ajuste a un modelo de regresión múltiple para describir la relación entre el Cambio dimensional en el diámetro interior y la temperatura °C, el tiempo en minutos, el % de cobre y el % de zinc.

Cuadro 4.7

RESUMEN DEL MODELO DEL CAMBIO DIMENSIONAL EN EL DIÁMETRO INTERIOR (b) DEL COJINETE.			
R	R ²	R ² (ajustado para los grados de libertad)	Error estándar-estimación
,571(a)	,326	,239	,71866

a Parámetros: (Constante), % Zn, Temperatura °C, Tiempo min, % Cu

b Variable dependiente: Cambio Dimensional Øint %

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 4.8

ANOVA DEL CAMBIO DIMENSIONAL EN EL DIÁMETRO INTERIOR(b)					
	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	Sig.
Modelo	7,743	4	1,936	3,748	,013(a)
Residuo	16,010	31	,516		
Total	23,753	35			

a Parámetros: (Constante), % Zn, Temperatura °C, Tiempo min, % Cu

b Variable dependiente: Cambio Dimensional Øint %

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 4.9

COEFICIENTES DEL CAMBIO DIMENSIONAL EN EL DIÁMETRO INTERIOR (a)				
Parámetro	Error estimación		t	Sig.
	B	Error estándar		
Constante	66,543	60,582	1,098	,280
Temperatura °C	-,003	,010	-,330	,744
Tiempo min	-,116	,033	-3,503	,001
% Cu	-,684	,614	-1,114	,274
% Zn	-,077	,231	-,336	,739

a Variable dependiente: Cambio Dimensional Øint % Fuente:
Elaboración propia

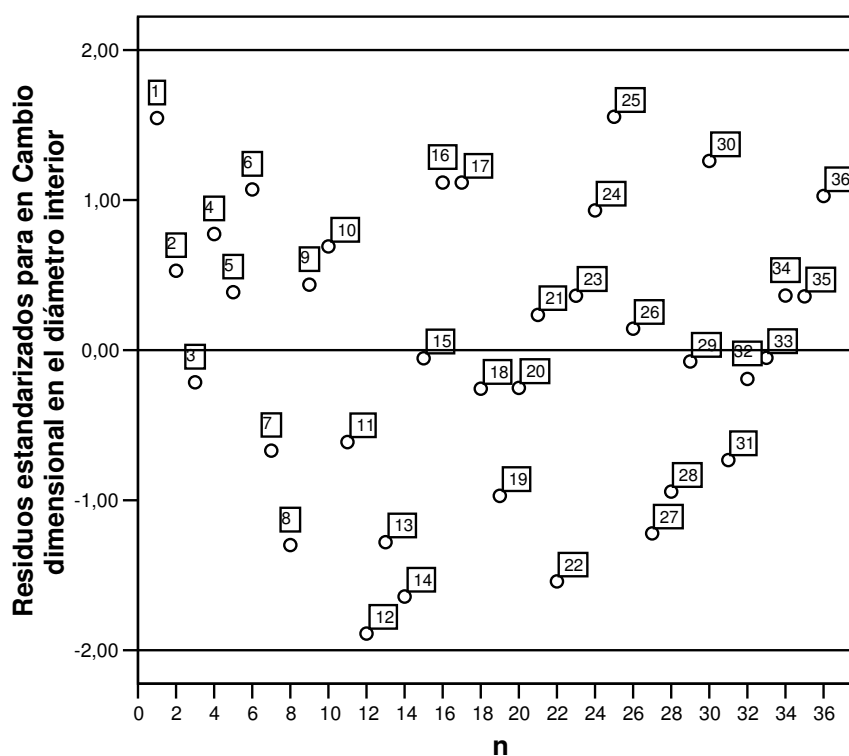


Fig. 4.35 Residuos del Cambio dimensional en el diámetro interior en función del número de datos.
Fuente: Elaboración propia

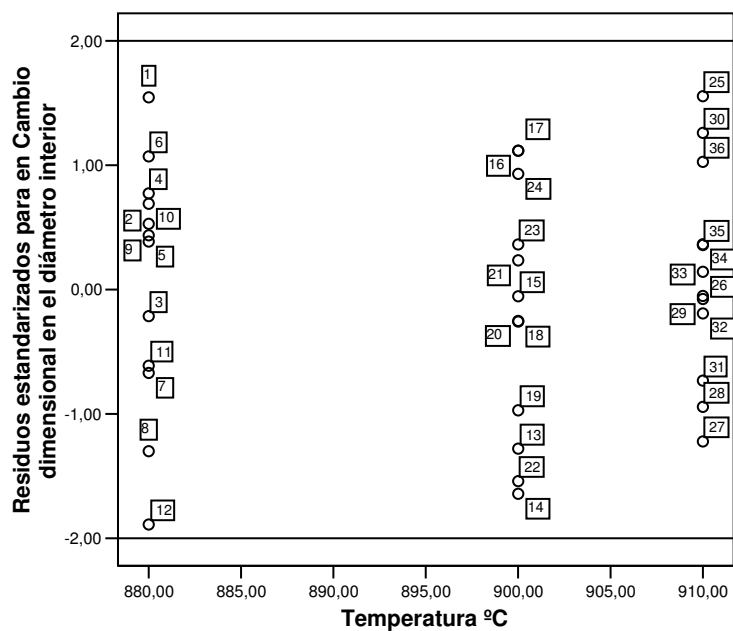


Fig. 4.36 Residuos del Cambio dimensional en el diámetro interior en función a la temperatura.

Fuente: Elaboración propia

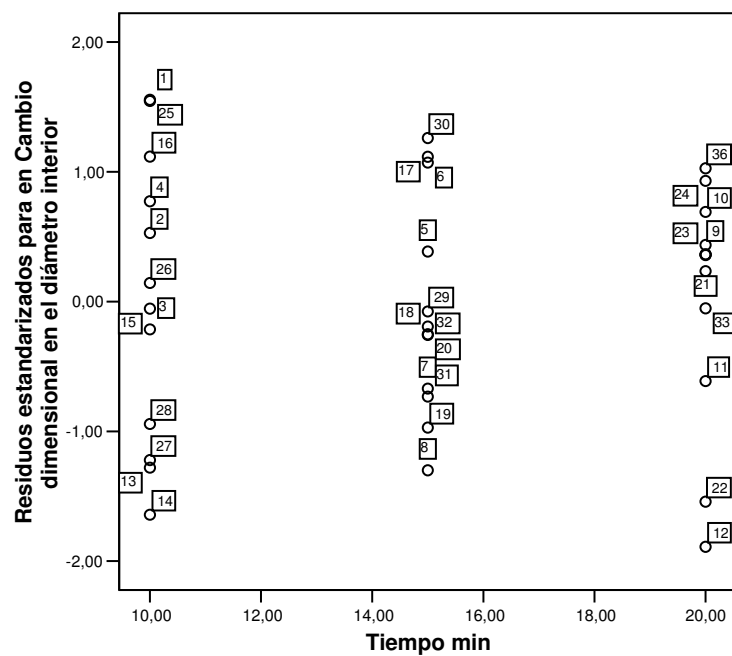


Fig. 4.37 Residuos del Cambio dimensional en el diámetro interior en función al tiempo.

Fuente: Elaboración propia

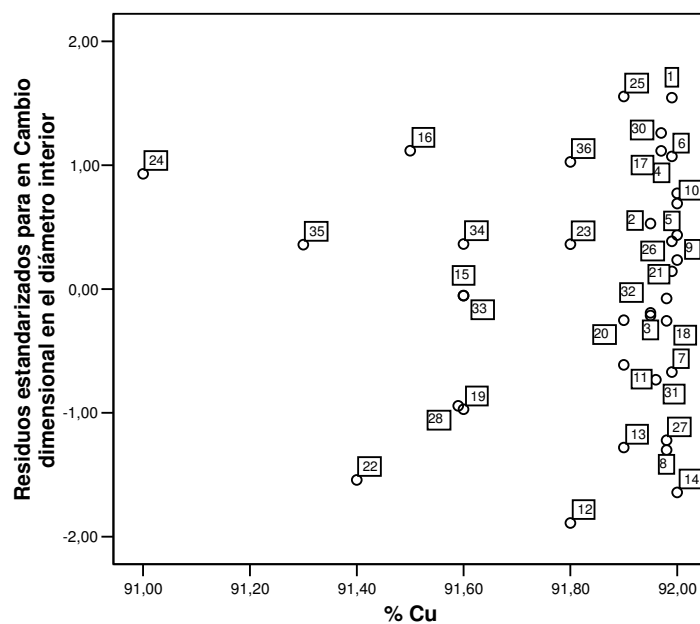


Fig. 4.38 Residuos del Cambio dimensional en el diámetro interior I en función del % de cobre.

Fuente: Elaboración propia

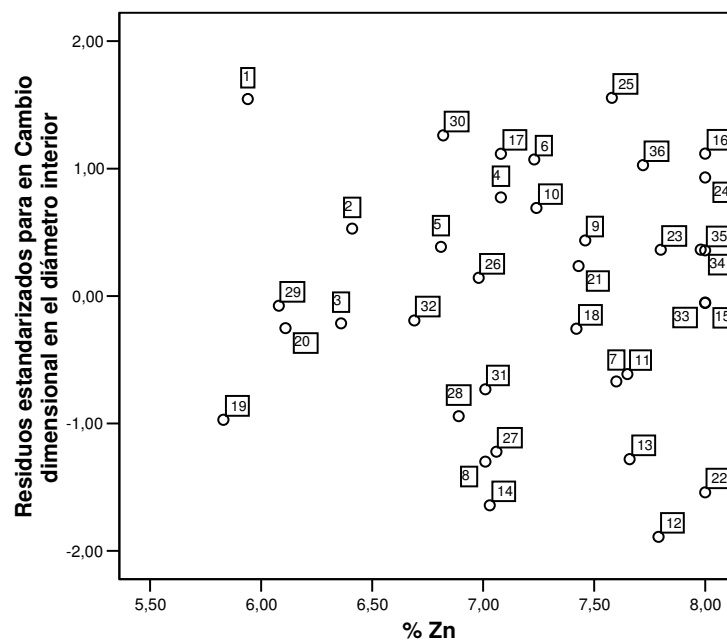


Fig. 4.39 Residuos del Cambio dimensional en el diámetro interior I en función del % de zinc.

Fuente: Elaboración propia.

4.5 Curvas del Cambio dimensional en la longitud

4.5.1 Tratamiento de sinterizado

El cambio dimensional en el diámetro interior en función de los bloques (Fig. 4.40) que se diseñaron para hacer las réplicas del sinterizado a diferentes condiciones de temperatura y tiempo; como es el caso del tratamiento 90010 (a 900°C por 10 minutos) con respecto al tratamiento de sinterizado 90020 (9000°C por 20 minutos) de los cuales se obtuvo cambios dimensionales en la longitud de 1.1 y 2.0% respectivamente.

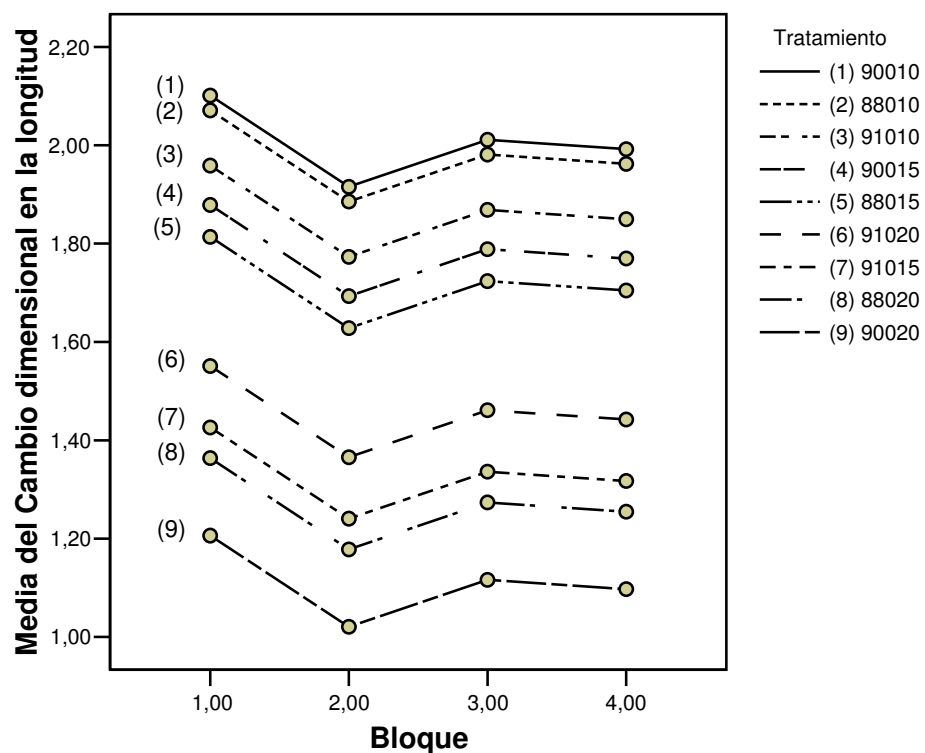


Fig. 4.40 Media del Cambio dimensional en la longitud en función a los bloques diseñados a diferentes temperaturas y tiempos.
Fuente: Elaboración propia.

En la Fig. 4.41, el Cambio dimensional en la longitud del cojinete autolubricado varia con el tratamiento de sinterizado en un rango aceptable lo cual nos da una ventaja para poder escoger la alternativa más adecuada teniendo en cuenta las otras propiedades. Los valores obtenidos son: +1.11% a 900°C por 20 minutos, +1.26% 880°C por 20 minutos, a 1.33% a 910°C por 15 minutos, 1.46% a 910°C por 20 minutos, 1.72% a 880°C por 15 minutos, 1.78% a 900°C por 15 minutos, 1.86% a 910°C por 10 minutos, 1.98% a 880°C por 10 minutos y 2.01% a 900°C por 10 minutos.

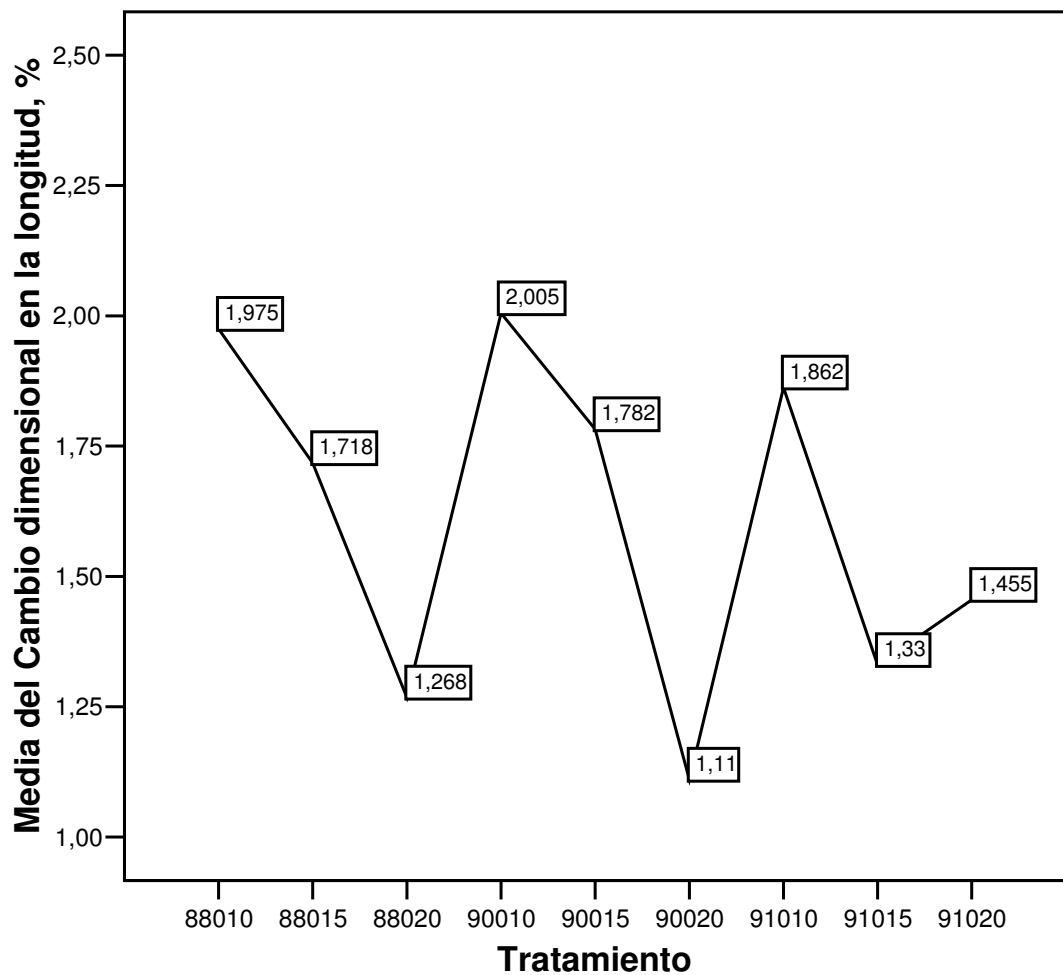


Fig. 4.41 Media del Cambio dimensional en la longitud en función al tratamiento de sinterizado.

Fuente: Elaboración propia.

Los residuos estandarizados del Cambio dimensional en la longitud, Fig. 4.42 están dentro del rango aceptable de -2 y $+2$ y todos los valores obtenidos caen alrededor de la recta de normalidad, Fig. 4.43.

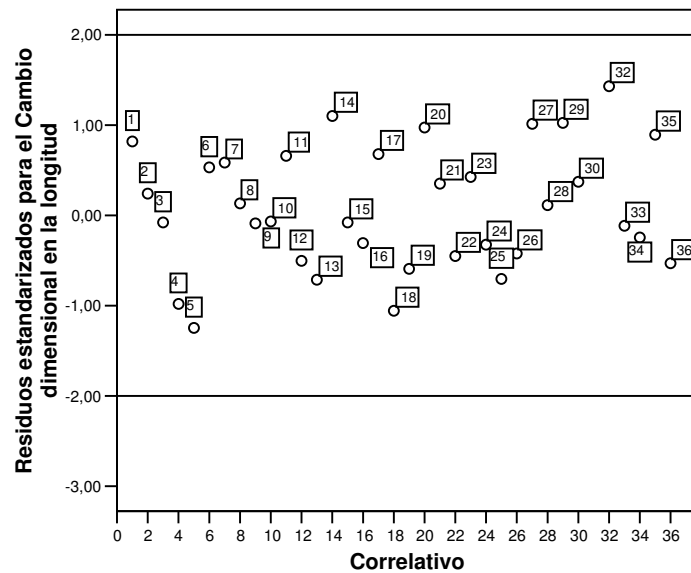


Fig. 4.42 Residuos estandarizados del Cambio dimensional en la longitud.
Fuente: Elaboración propia.

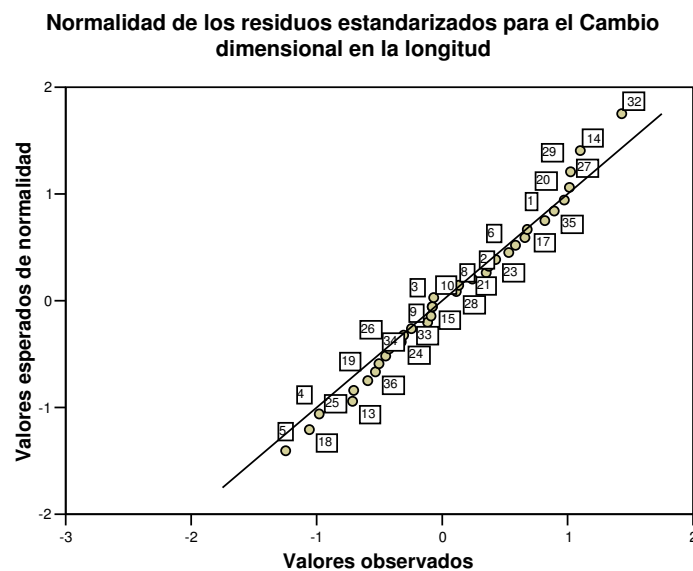


Fig. 4.43 Normalidad de los residuos estandarizados del Cambio dimensional en la longitud.
Fuente: Elaboración propia.

En las Fig. 4.44 y 4.45, se muestra como es la distribución del Cambio dimensional en la longitud en función de la temperatura y tiempo, gráficos que nos permitirán seleccionar la combinación más adecuada.

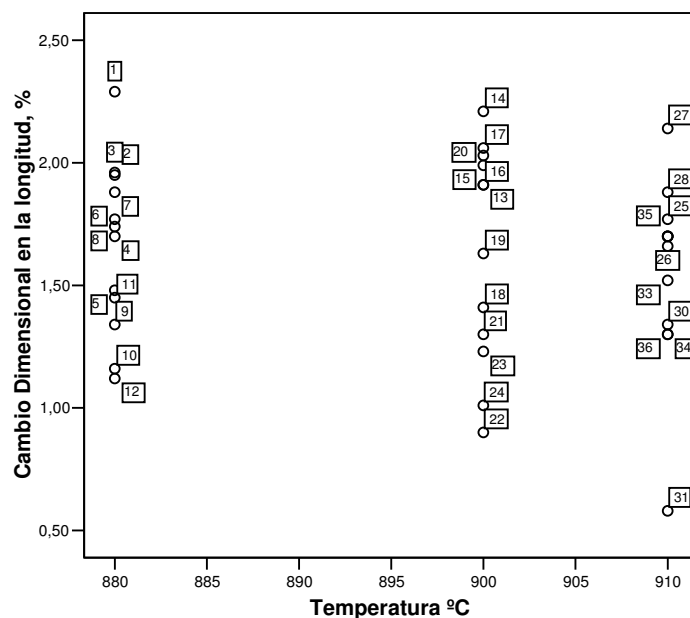


Fig. 4.44 Cambio dimensional en la longitud en función de la temperatura.
Fuente: Elaboración propia.

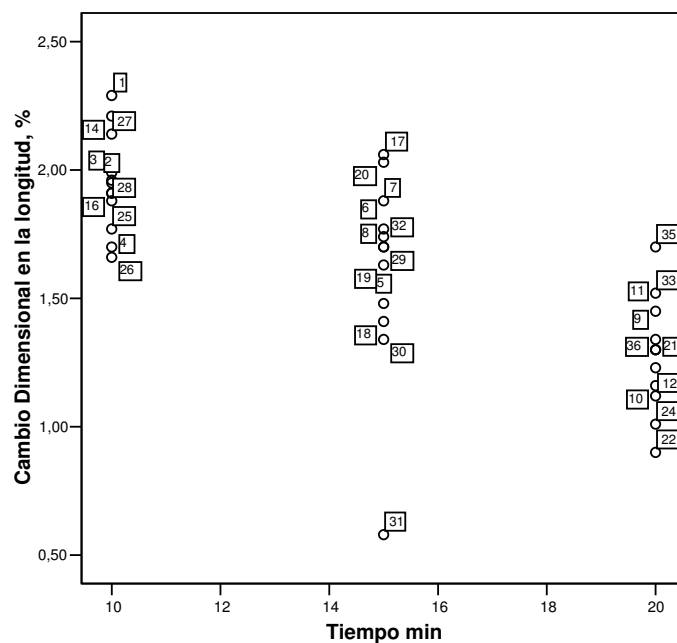


Fig. 4.45 Cambio dimensional en la longitud en función del tiempo.
Fuente: Elaboración propia.

El Cambio dimensional varia de +0.58 a +2.29% cuando el cobre está en un rango de 91-92% (Fig. 4.46) y el zinc está en un rango de 5.5-8.0% (Fig. 4.47).

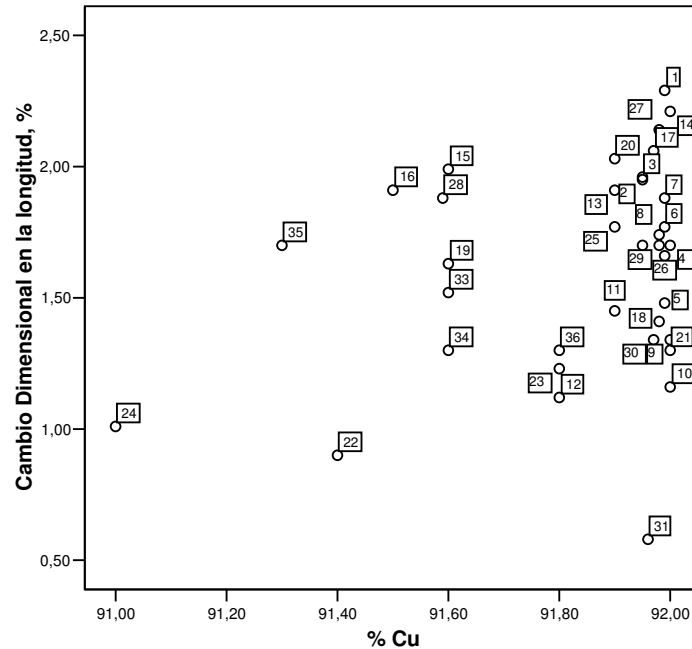


Fig. 4.46 Cambio dimensional en la longitud en función al porcentaje de cobre.
Fuente: Elaboración propia.

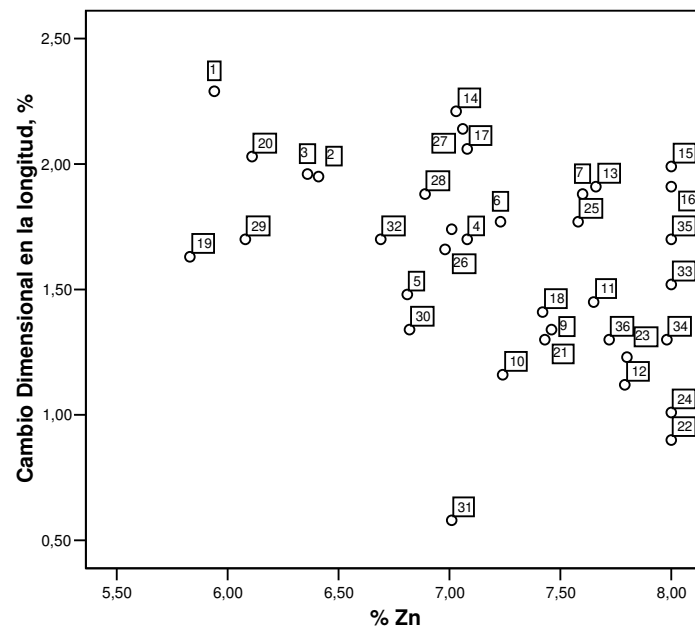


Fig. 4.47 Cambio dimensional en la longitud en función al porcentaje de zinc.
Fuente: Elaboración propia.

4.5.2 Regresión Múltiple del Cambio dimensional en la longitud

Las Cuadros 4.10, 4.11 y 4.12 y las Fig. 4.48 a la 4.52 muestran los resultados del ajuste a un modelo de regresión múltiple para describir la relación entre el Cambio dimensional en la longitud y la temperatura °C, el tiempo en minutos, el % de cobre y el % de zinc.

Cuadro 4.10			
RESUMEN DEL MODELO DEL CAMBIO DIMENSIONAL EN LA LONGITUD (b) DEL COJINETE			
R	R ²	R ² (ajustado para los grados de libertad)	Error estándar-estimación
,723(a)	,522	,461	,28659

a Parámetros: (Constante), Temperatura °C, Tiempo min, % Cu, % Zn

b Variable dependiente: Cambio Dimensional en la longitud, %

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 4.11

ANOVA DEL CAMBIO DIMENSIONAL EN LA LONGITUD. (b)					
	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	Sig.
Modelo	2,784	4	,696	8,475	,000(a)
Residual	2,546	31	,082		
Total	5,331	35			

a Parámetros: (Constante), Temperatura °C, Tiempo min, % Cu%, Zn

b Variable dependiente: Cambio Dimensional en la longitud, %

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 4.12

COEFICIENTES DEL CAMBIO DIMENSIONAL EN LA LONGITUD (a) DEL COJINETE SINTERIZADO.				
Parámetro	Error estimación		t	Sig.
	B	Error estándar		
(Constante)	10,088	24,159	,418	,679
Temperatura °C	-,003	,004	-,726	,473
Tiempo min	-,064	,013	-4,837	,000
% Cu	-,048	,245	-,197	,845
% Zn	-,061	,092	-,661	,513

a Variable dependiente: Cambio Dimensional en la longitud, %

Fuente: Elaboración propia

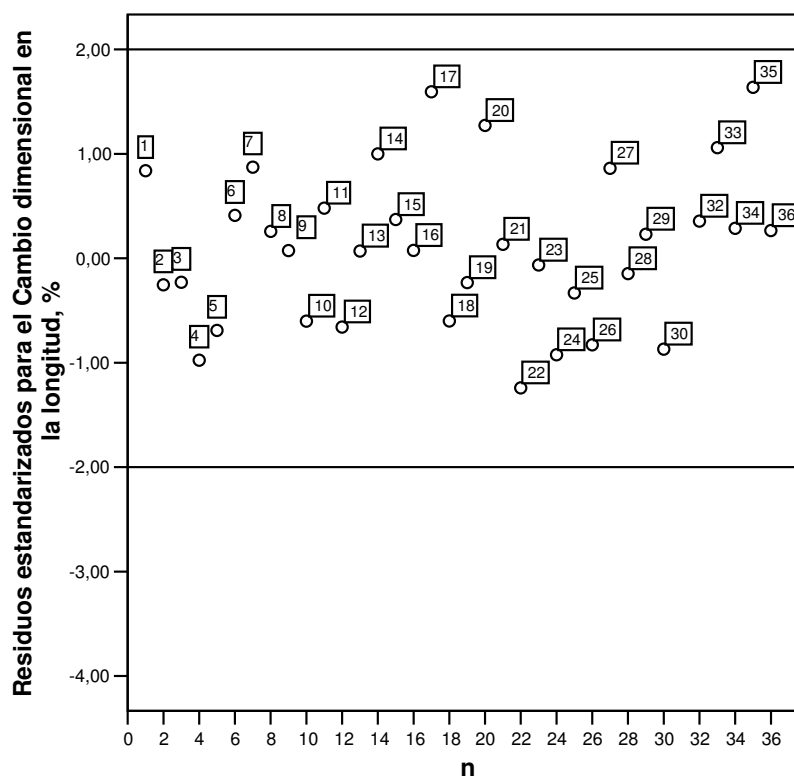


Fig. 4.48 Residuos del Cambio dimensional en la longitud en función del número de datos.

Fuente: Elaboración propia

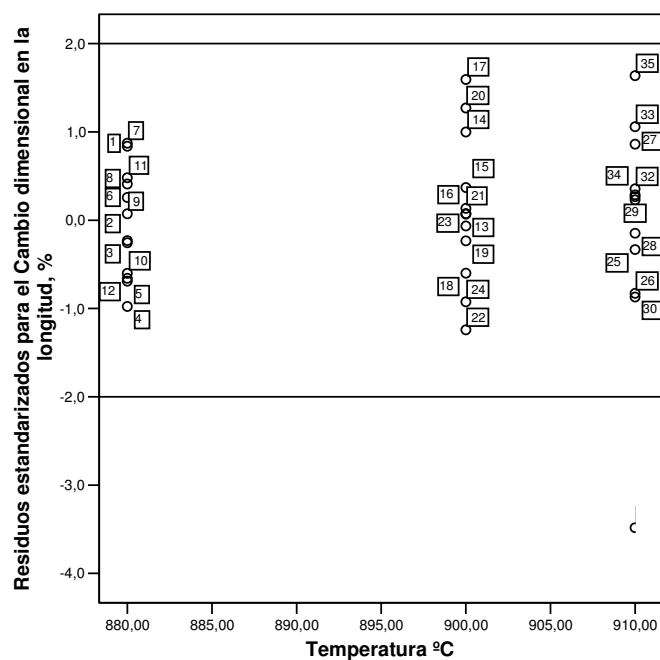


Fig. 4.49 Residuos del Cambio dimensional en la longitud en función de la temperatura.

Fuente: Elaboración propia

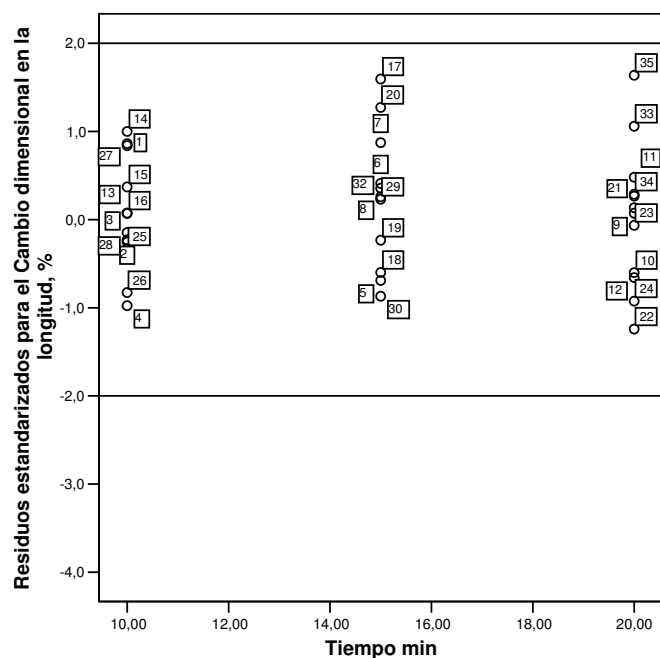


Fig. 4.50 Residuos del Cambio dimensional en la longitud en función del tiempo.

Fuente: Elaboración propia

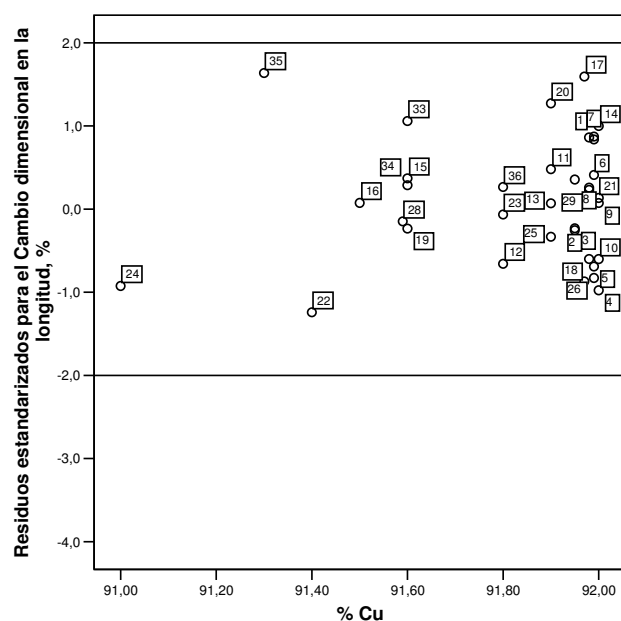


Fig. 4.51 Residuos del Cambio dimensional en la longitud en función del porcentaje de cobre.
Fuente: Elaboración propia.

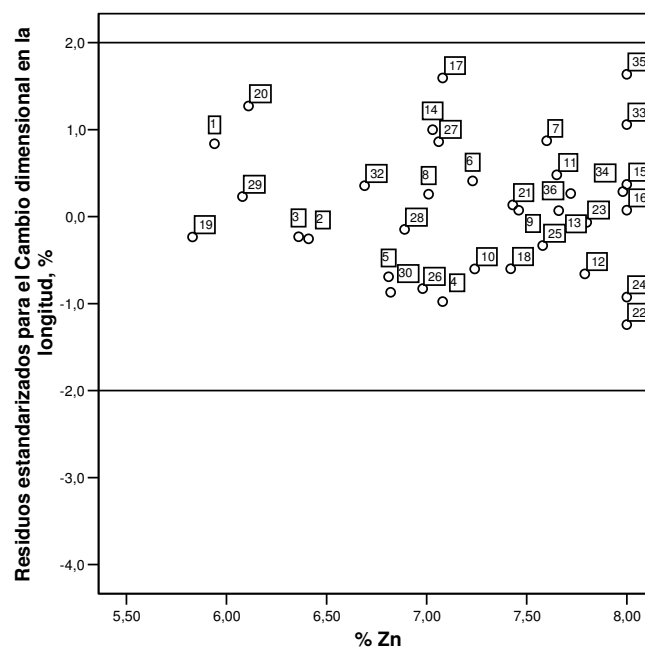


Fig. 4.52 Residuos del Cambio dimensional en la longitud en función del porcentaje de zinc.
Fuente: Elaboración propia.

4.6 Modelamiento matemático empírico

Los modelos matemáticos empíricos obtenidos son sumamente valiosos para la comprensión del comportamiento de la aleación $92\text{Cu}8\text{Zn}1\text{Zn}(\text{C}_{10}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$ frente al sinterizado a diferentes temperaturas y tiempos. Existen dos razones para esto:

1. Tienen la visión física del proceso.
2. Permiten simular nuevas modificaciones en la computadora ahorrando de esta manera inversiones en experimentos, prototipos o plantas piloto.

Los modelos matemáticos tienen una característica en común: que un aspecto deseado del proceso puede predecirse a través de expresiones matemáticas que describen las características físicas y químicas (Méndez y Eagar, 2000). Utilizando el software Statgraphics plus y el SSPS se han construido cuatro modelos matemáticos, que son capaces de modelar el comportamiento del factor de resistencia a la rotura radial, del cambio dimensional en el diámetro exterior, del cambio dimensional en el diámetro interior y del cambio dimensional en la longitud del cojinete en función de la temperatura, del tiempo, del porcentaje de cobre y del porcentaje de zinc.

El método empleado para la determinación del modelo es la Regresión Múltiple, que resuelve cuatro modelos matemáticos empíricos con cuatro variables independientes, utilizando el ajuste por mínimos cuadrados, para lo cual es necesario cargar previamente en la memoria del fichero de datos que contienen las variables de la regresión (Cuadro 4.13), especificado de la siguiente manera:

Cuadro 4.13

VARIABLES DE LA REGRESIÓN MÚLTIPLE		
Modelo	Variable dependiente	Variables independientes
MC1	Factor de resistencia a la rotura radial, kg/mm ² .	Temperatura Tiempo Porcentaje de cobre Porcentaje de zinc
MC2	Cambio dimensional en el diámetro exterior del cojinete sinterizado, %.	
MC3	Cambio dimensional en el diámetro interior del cojinete sinterizado, %.	
MC4	Cambio dimensional en la longitud del cojinete sinterizado, %.	

Es importante mencionar que los modelos matemáticos empíricos obtenidos pueden ser usados para demostrar la influencia de la temperatura(T), tiempo(t), porcentaje de cobre(Cu), porcentaje de zinc(Zn) en las propiedades de los cojinetes después del sinterizado a diferentes condiciones de temperatura y tiempo.

4.6.1 Modelo Matemático Empírico MC1 para calcular el factor de resistencia a la rotura radial (FR), en el cojinete sinterizado fabricado con la nueva aleación 92Cu8Zn1Zn(C₁₀H₃₅O₂)₂.

El análisis estadístico se realizó empleando los software Statgraphics y SPSS, que permitieron obtener resultados del ajuste a un modelo de regresión múltiple para describir la relación entre el Factor de resistencia a la rotura radial del cojinete. La ecuación del modelo ajustado es:

$$FR = -119.38 + 0.0788816 * T + 0.229745 * t + 0.623392 * Cu - 0.152118 * Zn$$

Donde: T : Temperatura en °C
 t : tiempo en minutos
 Cu : % de Cobre
 Zn : % de Zinc

$$R^2 = 60.2191\%$$

Dado que el valor sig en el análisis de varianza es inferior a 0.01 existe relación estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza del 99%. El estadístico R^2 indica que el modelo MC1 explica un 60.2% de la variabilidad en el Factor de resistencia a la rotura radial del cojinete sinterizado.

El error estándar de la estimación muestra la desviación típica de los residuos que es 1,10928. Este valor puede usarse para construir los límites de predicción para las nuevas observaciones.

4.6.2 Modelo Matemático Empírico MC2 para calcular el cambio dimensional en el diámetro exterior (CDE), en el cojinete sinterizado fabricado con la nueva aleación 92Cu8Zn1Zn(C₁₀H₃₅O₂)₂..

El método empleado para construir un modelo para predecir el Cambio dimensional en el diámetro exterior dados los valores de temperatura, tiempo, % de cobre y % de zinc es el de regresión múltiple. La ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{CDE} = -107,795 - 0,00870856 * T - 0,0812205 * t + 1,2347 * \text{Cu} + 0,309536 * \text{Zn}$$

Donde: T : Temperatura en °C
 t : tiempo en minutos
 Cu : % de Cobre
 Zn : % de Zinc

$$R^2 = 61,0434 \%$$

Como el valor sig en el análisis de varianza es inferior a 0.01 entonces existe relación estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza del 99%.

El estadístico R^2 nos indica que el modelo MC2 explica un 61.0% de la variabilidad en el Cambio dimensional en el diámetro exterior del cojinete sinterizado.

El error estándar de la estimación muestra la desviación típica de los residuos que es 0,392708. Este valor puede usarse para construir los límites de predicción para las nuevas observaciones.

4.6.3 Modelo Matemático Empírico MC3 para calcular el cambio dimensional en el diámetro interior (CDI) en el cojinete sinterizado fabricado con la nueva aleación 92Cu8Zn1Zn(C₁₀H₃₅O₂)₂.

Los resultados obtenidos muestran un ajuste a un modelo de regresión múltiple para describir la relación entre el Cambio dimensional en el diámetro interior del cojinete y la temperatura, el tiempo, el % de cobre y el % de zinc. La ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{CDI} = 66,5426 - 0,00338034 * T - 0,115796 * t - 0,684216 * \text{Cu} - 0,0774167 * \text{Zn}$$

	T	:	Temperatura en °C
Donde:	t	:	tiempo en minutos
	Cu	:	% de Cobre
	Zn	:	% de Zinc

$$R^2 = 32,5963 \%$$

El valor sig en el análisis de varianza es inferior a 0.05 entonces existe relación estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza del 95%.

El estadístico R^2 nos indica que el modelo MC3 explica un 32.6% de la variabilidad en el Cambio dimensional en el diámetro interior del cojinete sinterizado.

El error estándar de la estimación muestra la desviación típica de los residuos que es 0.718658. Este valor puede usarse para construir los límites de predicción para las nuevas observaciones.

4.6.4 Modelo Matemático Empírico MC4 para calcular el cambio dimensional en la longitud (CDL), en el cojinete sinterizado fabricado de la nueva aleación 92Cu8Zn1Zn(C₁₀H₃₅O₂)₂.

La aplicación de un análisis estadístico generó los resultados del ajuste a un modelo de regresión múltiple para describir la relación entre el Cambio dimensional en la longitud del cojinete y la temperatura, tiempo, % de cobre y % de zinc. La ecuación del modelo ajustado es:

$$CDL = 10,0876 - 0,00296794 * T - 0,0637663 * t - 0,0481257 * Cu - 0,0608305 * Zn$$

Donde: T : Temperatura en °C
 t : tiempo en minutos
 Cu : % de Cobre
 Zn : % de Zinc

$$R^2 = 52,2334 \%$$

Como el valor sig en el análisis de varianza es inferior a 0.01, existe relación estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza del 99%. El estadístico R^2 indica que el modelo MC4 explica un 52.2% de la variabilidad en el Cambio dimensional en la longitud del cojinete sinterizado.

El error estándar de la estimación muestra la desviación típica de los residuos que es 0.286593. Este valor puede usarse para construir los límites de predicción para las nuevas observaciones.

CONCLUSIONES

Las conclusiones de la presente tesis doctoral para la fabricación de cojinetes autolubricados con la nueva aleación $92\text{Cu}8\text{Zn}1\text{Zn}(\text{C}_{10}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$ son las siguientes:

1. Proceso de sinterizado óptimo para : Es a 900°C por un tiempo de 20 minutos.
2. Propiedades:

2.1	Coeficiente de rotura	=	12.5 kg/mm ²
2.2	Cambio dimensional en el Φ exterior	=	- 1.7975%
2.3	Cambio dimensional en el Φ interior	=	- 2.0625%
2.4	Cambio dimensional en la longitud	=	+ 1.11%
2.5	Densidad	=	6.92 g/cm ³
2.6	Porosidad	=	14%

3. Modelos Matemáticos empíricos.

El rango de aplicación de los modelos matemáticos empíricos MC1, MC2, MC3 y MC4 es:

Rango de Aplicación de los Modelos matemáticos empíricos MC1, MC2, MC3 y MC4		
Temperatura de sinterizado	:	880 – 910 °C
Tiempo de sinterizado	:	10 – 20 minutos
Porcentaje de cobre	:	91 – 92 %
Porcentaje de zinc	:	5.83 – 8 %

3.1 Modelo Matemático empírico MC1 para el Coeficiente de fractura (FR) de los cojinetes autolubricados:

$$FR = -119.38 + 0.0788816 \cdot T + 0.229745 \cdot t + 0.623392 \cdot Cu - 0.152118 \cdot Zn$$

$$R^2 = 60.2191\%$$

Dado que el valor sig en el análisis de varianza es inferior a 0.01 existe relación estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza del 99%.

El estadístico R^2 indica que el modelo MC1 explica un 60.2% de la variabilidad en el Factor de resistencia a la rotura radial del cojinete sinterizado.

3.2 Modelo Matemático empírico MC2 para el Cambio dimensional en el diámetro exterior (CDE) de los cojinetes autolubricados

$$CDE = -107,795 - 0,00870856 \cdot T - 0,0812205 \cdot t + 1,2347 \cdot Cu + 0,309536 \cdot Zn$$

$$R^2 = 61,0434 \%$$

Como el valor sig en el análisis de varianza es inferior a 0.01 entonces existe una relación estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza del 99%.

El estadístico R^2 nos indica que el modelo MC2 explica un 61.0% de la variabilidad en el Cambio dimensional en el diámetro exterior del cojinete sinterizado.

3.3 Modelo Matemático empírico MC3 para el Cambio dimensional en el diámetro interior (CDI) de los cojinetes autolubricados.

$$CDI = 66,5426 - 0,00338034 * T - 0,115796 * t - 0,684216 * Cu - 0,0774167 * Zn$$

$$R^2 = 32,5963 \%$$

El valor sig en el análisis de varianza es inferior a 0.05 entonces existe una relación estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza del 95%.

El estadístico R^2 nos indica que el modelo MC3 explica un 32.6% de la variabilidad en el Cambio dimensional en el diámetro interior del cojinete sinterizado.

3.4 Modelo Matemático empírico MC4 para el Cambio dimensional en la longitud (CDL) de los cojinetes autolubricados.

$$CDL = 10,0876 - 0,00296794 * T - 0,0637663 * t - 0,0481257 * Cu - 0,0608305 * Zn$$

$$R^2 = 52,2334 \%$$

Como el valor sig en el análisis de varianza es inferior a 0.01 existe relación estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza del 99%.

El estadístico R^2 indica que el modelo MC4 explica un 52.2% de la variabilidad en el Cambio dimensional en la longitud del cojinete sinterizado.

RECOMENDACIONES

Las recomendaciones para la nueva aleación $92\text{Cu}8\text{Zn}1\text{Zn}(\text{C}_{10}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$ son:

- » Que los resultados de la presente tesis son un inicio para efectuar pruebas de fabricación en serie de cojinetes autolubricados.
- » Realizar el estudio de metalografía electrónica con análisis químico a fin de investigar los compuestos que se forman y determinar su influencia en el coeficiente de rotura y en el cambio dimensional de los cojinetes autolubricados.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ADAMUZ, M. Pulvimetalurgia. Fecha de consulta: 10 Febrero de 2006.
Disponible en: www.uco.es/pulvimetalurgia.html
- [2] ALFERIEFF. Fecha de consulta: 10 Febrero 2006. Disponible en :
www.alferieff.com/hornosalferief.htm
- [3] AMES. Fases. Fecha de consulta 13 Febrero 2006. Disponible en:
www.ames.es
- [4] AMES. Sinterizado. Fecha de consulta 13 Febrero 2006. Disponible en :
www.ames.es
- [5] AMETEK, Pruebas Independientes Realizadas Muestran que el 316L Plus™ es el Polvo de Metal de Acero Inoxidable más Resistente a la Corrosión en la Industria. Fecha de consulta: 13 Febrero 2006. Disponible en:
[http://www.ametekmetals/cambio dimensional de polvo 316L.htm](http://www.ametekmetals/cambio_dimensional_de_polvo_316L.htm)
- [6] ASTM(Annual Book of ASTM Standards), B 243-83. 1984
- [7] AVNER, S. Introducción a la metalurgia física, Editorial McGraw - Hill Book Co., INC., U.S.A. 1979
- [8] BHADSHIA H K D H. Atomic diffusion, Materials Science & Metallurgy, 2nd year course, Metals and Alloys. (2003).
- [9] BHADSHIA H K D H. Diffusional formation of ferrite in iron and its alloys, University of Cambridge. (1985)
- [10] BOKSHTEIN B.S. Difusión en metales, Editorial Mir, Moscú. (1978).
- [11] CALDERÓN, Marilú. Modelo “ULIRAM” Para Determinar Nuevas Composiciones Químicas para Materiales de Aporte. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú. 2004. pp. 29-37
- [12] CALDERÓN, Marilú. Nitruración en Baño de Sales, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Tesis, Lima, Perú. 1984.

- [13] CAMPOS M. Tecnología de Polvos. Universidad Carlos II de Madrid. Fecha de Consulta: 01 de Febrero de 2005. Disponible en [http://www.uc3m.es/tecnologia de polvos](http://www.uc3m.es/tecnologia%20de%20povos).
- [14] CERAMITEC, Últimas tendencias en el sector pirometalúrgico: Fecha de consulta: 19 de Junio de 2006. Disponible en: www.ceramitec.de.htm
- [15] CIENCIA, Pulvimetalurgia. Fecha de consulta: 10 de Febrero de 2006. Disponible en: www.ciencia.net/Pulvimetalurgia.htm
- [16] DICOI, Pulvimetalurgia. Fecha de consulta: 10 de Febrero de 2006. Disponible en: <http://www.dicoi.net/pulvim.htm>
- [17] EPMA, Powder Metallurgy. Fecha de consulta: 26 de Octubre de 2004: Disponible en www.epma.com
- [18] FORJISINTER IND COM LTDA, Fecha de consulta: 15 de Octubre de 2005. Disponible en: <http://www.ciespoeste.org.br>
- [19] GHEORGHE, S. MANGRA, M. CIUPITU, I. GINGU, O. The Influence of the Manufacturing Factors of the Cooper Base Sintered Parts on Wear Strength, University of Craiova, Romania. Disponible en: stefan.gheorghe@personal.ro
- [20] HAUSNER. H, Handbook of Powder Metallurgy, Chemical Publishing Co., Inc., United States of America. (1977)
- [21] HAMILTON. Processo de Sinterização. Fecha de Consulta: 01 Julio 2006. Disponible en: <http://cursos.unisanta.br/mecanica/polari/sinterizacao.html>
- [22] HERNANDEZ, R. FERNÁNDEZ, C. BAPTISTA, P. Metodología de la Investigación, Editorial McGraw Hill Interamericana, México. 2006
- [23] IBINSA, Bronce sinterizado. Fecha de consulta 19 de Junio de 2006. Disponible en: http://ibinsa.com/html/bronze_sinterizado.html
- [24] LAJTÍN YU; ARZAMÁSOV B. Tratamiento termoquímico de los metales, Editorial MIR, Moscú. 1985.
- [25] LEÓN, B. DUARTE, R. Metalurgia do pó. Fecha de consulta: 01 Julio 2006. Disponible en: <http://meusite.mackenzie.com.br/carlosmonezi/seminarios/>

- lo_semestre/1_2003/metallurgia_do_po_16042003_resumo.pdf
- [26] MALLQUI, F. Producción de Polvos Metálicos, Curso de Postgrado de Pulvimetalurgia, Unidad de Postgrado – Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú, Febrero 2006.
- [27] MALLQUI, M. Curso de Postgrado de Pulvimetalurgia, Unidad de Postgrado – Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú, Febrero 2006.
- [28] MENDEZ, P.F; EAGAR T. W., Modeling of Complex Materials Processing Problems, Seawater Piping on Naval Ships, Naval Architecture and Marine Engineering, Cambridge, 2000.
- [29] MILKE, E. Moldeo de los Polvos, Curso de Postgrado de Pulvimetalurgia, Unidad de Postgrado – Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú, Febrero 2006.
- [30] MOLERA, P. Introducción a la pulvimetalurgia, Ediciones Bellaterra, S.A., 1977.
- [31] MONESI, C. Metalurgia do pó, Curso de Técnicas de produção e controle II, Escola de Engenharia-Departamento Mecânica, Universidade Presbiteriana Mackenzie, Brazil. (2006)
- [32] MULTIWIDIA. Metalurgia de los polvos. Disponible en www.multiwidia.com.ar
- [33] NOVEX. Mancais. [en línea]. Fecha de consulta: 13 Febrero 2006. Disponible en www.novex.com.br/mancais.htm
- [34] PÉREZ, C. Estadística práctica con Statgraphics, Universidad Computense de Madrid. España, 2002.
- [35] PLATI A., Modelling of γ Precipitation in Superalloys, Tesis, Universidad de Cambridge, 2003.
- [36] QUALISINTER. O Processo de Metalurgia do Pó qualisinter [en línea]. Fecha de consulta: 13 Febrero 2006. Disponible en [www. qualisinter com br Processo.htm](http://www.qualisinter.com.br/Processo.htm)
- [37] REED-HILL R.E. Principios de Metalurgia Física, México. (1996).

- [38] RIVERA, J. JUÁREZ, A. SÁNCHEZ DE JESÚS, F. Atomización con gas: Una visión actual. Fecha de consulta: 01 Julio 2006. Disponible en: http://www.upmx.mx/pulvimetalurgia/Congreso/Ponencias/Ponencia_JGuadalupe.pdf
- [39] SÁNCHEZ, José. Metalurgia de polvos. [en línea]. TECNUN. Fecha de consulta: 10 Febrero 2003. Disponible en: <http://www1.ceit.es/asignaturas/pulvimetal/docs/tema1.pdf>
- [40] SERRANO, P. SUWARDJO, W. Obtención y caracterización del polvo aleado Cu-Sn-Pb-Sn para la fabricación de cojinetes antifricción. [en línea]. La Habana, Centro de Investigaciones Metalúrgicas. Fecha de consulta: 10 Febrero 2006. Disponible en: <http://www.cursosenlinea.cu/eventosv/tecnomat/Caracterizacion/Obtenci%F3n%20y%20caract%20del%20polvo%20aleado%20Cu-Sn-Pb-Sn%20.doc>
- [41] SINTERPRES. Fecha de consulta: 29 Octubre de 2004. Disponible en: http://www.sinterpres.com/Sinterpres,S_L.htm
- [42] STADLER. Normas DIN. Fecha de consulta: 10 Febrero 2006. Disponible en: www.stadler.es/normas.DIN.htm
- [43] TAHIR, S.M. y ARIFFIN, A. K Fracture in metal powder. International Journal of Solids and Structures 43 (2006)1528 –1542, 2005.
- [44] TECNUN. Sinterizado. Fecha de consulta: 10 Febrero 2006: Disponible en: <http://www1.ceit.es/asignaturas/pulvimetal/docs/Tema7.pdf>
- [45] UNIVERSIDAD COMPÚTENSE, Curso Básico de Statgraphics, España, 2002.
- [46] UNIVERSIDAD DE NAVARRA, CMS Reforzados por Partículas, España 2002.
- [47] WIKIPEDIA, Pulvimetalurgia. Fecha de consulta: 25 Octubre 2004. Disponible en: <http://es.wikipedia.org/wiki/Pulvimetalurgia>.